



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE
CHIMBORAZO**

**FACULTAD DE MECÁNICA
ESCUELA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL**

**“DESARROLLO DE UN PROCEDIMIENTO DE
SOLDADURA CON PROCESO FCAW, MEDIANTE LA
APLICACIÓN DEL CÓDIGO AWS D1.1/2010 Y
D1.5M/D1.5 EN PUENTES ESTRUCTURALES Y
ANÁLISIS DE LA MICROESTRUCTURA POST-
SOLDADURA”**

BADILLO PUCHA JOSÉ GUSTAVO

TESIS DE GRADO

Previa a la obtención del Título de:

INGENIERO INDUSTRIAL

RIOBAMBA – ECUADOR

2014

ESPOCH

Facultad de Mecánica

CERTIFICADO DE APROBACIÓN DE TESIS

2014-07-04

Yo recomiendo que la Tesis preparada por:

JOSÉ GUSTAVO BADILLO PUCHA

Titulada:

“DESARROLLO DE UN PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA CON PROCESO FCAW, MEDIANTE LA APLICACIÓN DEL CÓDIGO AWS D1.1/2010 Y D1.5M/D1.5 EN PUENTES ESTRUCTURALES Y ANÁLISIS DE LA MICROESTRUCTURA POST-SOLDADURA”

Sea aceptada como parcial complementación de los requerimientos para el Título de:

INGENIERO INDUSTRIAL

Ing. Marco Santillán Gallegos.
DECANO DE LA FAC. DE MECÁNICA

Nosotros coincidimos con esta recomendación:

Ing. Jorge Freire M.
DIRECTOR DE TESIS

Ing. Marcelo Jácome.
ASESOR DE TESIS

ESPOCH

Facultad de Mecánica

CERTIFICADO DE EXAMINACIÓN DE TESIS

NOMBRE DEL ESTUDIANTE: JOSÉ GUSTAVO BADILLO PUCHA

TÍTULO DE LA TESIS: “DESARROLLO DE UN PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA CON PROCESO FCAW, MEDIANTE LA APLICACIÓN DEL CÓDIGO AWS D1.1/2010 Y D1.5M/D1.5 EN PUENTES ESTRUCTURALES Y ANÁLISIS DE LA MICROESTRUCTURA POST-SOLDADURA”

Fecha de Examinación: 2014-12-19

RESULTADO DE LA EXAMINACIÓN:

COMITÉ DE EXAMINACIÓN	APRUEBA	NO APRUEBA	FIRMA
Ing. Carlos Santillán Mariño PRESIDENTE TRIB. DEFENSA			
Ing. Jorge Freire M. DIRECTOR DE TESIS			
Ing. Marcelo Jácome ASESOR			

* Más que un voto de no aprobación es razón suficiente para la falla total.

RECOMENDACIONES: _____

El Presidente del Tribunal certifica que las condiciones de la defensa se han cumplido.

Ing. Carlos Santillán Mariño
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL

DERECHOS DE AUTORÍA

El trabajo de grado que presentamos, es original y basado en el proceso de investigación y/o adaptación tecnológica establecido en la Facultad de Mecánica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. En tal virtud, los fundamentos teóricos - científicos y los resultados son de exclusiva responsabilidad de los autores. El patrimonio intelectual le pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

José Gustavo Badillo Pucha

DEDICATORIA

Agradezco infinitamente a la gloriosa “Escuela Superior Politécnica de Chimborazo” por ofrecer a los estudiantes la oportunidad de obtener una profesión, para de esta manera poder servir a nuestro país.

También quiero agradecer a todas y cada una de las personas que de una u otra manera me han brindado el apoyo necesario para culminar con éxito mis estudios.

José Gustavo Badillo Pucha

AGRADECIMIENTO

Al todopoderoso, por darme la oportunidad de cumplir con mi sueño de ser un profesional; por otro lado quiero dedicar a mis hijas; Alejandra, María José y mi adorada esposa Mirian quienes son mi familia y por ellas me esfuerzo cada día de mi vida.

A los seres quienes me dieron la vida y me brindaron su apoyo incondicional en todo sentido desde el primer día en que vine al mundo y supieron con cariño, respeto, paciencia y comprensión guiarme por el sendero del bien, gracias a mis padres María y Belisario. Cómo no agradecer a mi querida Suegra Alicia por depositar la confianza en mí, y otorgarme el apoyo necesario en todo momento.

A mis incondicionales y queridos hermanos, por darme su apoyo cuando más lo necesitaba, gracias por darme sus sabios consejos. Quiero también agradecer de manera especial a mi hermanita María Eugenia a quien Dios la tiene en su reino y que desde ahí vela por toda mi familia.

José Gustavo Badillo Pucha

CONTENIDO

	Pág.
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Antecedentes.....	1
1.2 Justificación.....	2
1.3 Objetivos.....	4
1.3.1 <i>Objetivo general.</i>	4
1.3.2 <i>Objetivos específicos</i>	4
2. MARCO TEÓRICO	5
2.1 Soldadura por arco con alambre tubular (FCAW)	5
2.1.1 <i>Alambre tubular</i>	5
2.1.2 <i>Procedimientos para la soldadura por arco con alambre tubular (FCAW).</i> ..	7
2.2 Requerimientos generales de WPS.....	9
2.2.1 <i>Requerimientos de soldadura vertical ascendente</i>	9
2.2.2 <i>Limitación anchura/profundidad del pase.</i>	11
2.2.3 <i>Requerimientos de soldadura sobre cabeza</i>	11
3. CALIFICACIÓN DE PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA	13
3.1 Requerimientos generales.....	13
3.1.1 <i>Especificación y periodo de efectividad</i>	13
3.1.2 <i>Requerimientos comunes para WPS y calificación de desempeño del personal de soldadura.</i>	13
3.2 Especificación del procedimiento de soldadura (WPS).	14
3.2.1 <i>Posiciones de soldadura de producción calificadas</i>	14
3.2.2 <i>Tipo de ensayo de calificación.</i>	15
3.2.3 <i>Tipo de soldadura para calificación del WPS</i>	15
3.2.4 <i>Preparación de WPS</i>	16
3.2.5 <i>Calificación del metal base.</i>	17
3.2.6 <i>Métodos de ensayo y criterios de aceptación para la calificación de WPS.</i>	23
3.2.7 <i>Soldaduras de canal CJP para conexiones no tubulares</i>	31
3.2.8 <i>Soldaduras de filete para conexiones tubulares y no tubulares son:</i>	32
3.2.9 <i>Juntas a tope</i>	36

4.	CALIFICACIÓN DEL DESEMPEÑO DEL SOLDADOR (WPQ).....	38
4.1	Calificación del desempeño.....	38
4.1.1	<i>Posiciones de soldadura de producción calificadas</i>	<i>38</i>
4.1.2	<i>Espesores de producción calificados</i>	<i>39</i>
4.1.3	<i>Calificación del soldador y operador de soldadura a través de calificación WPS</i>	<i>40</i>
4.1.4	<i>Tipos de ensayo de calificaciones requeridas son:</i>	<i>40</i>
4.1.5	<i>Pre calentamiento del metal base y su ejecución.</i>	<i>40</i>
4.1.6	<i>Características eléctricas del fabricante.....</i>	<i>40</i>
4.1.7	<i>Características eléctricas de soldeo.....</i>	<i>41</i>
4.1.8	<i>Diseños de juntas según WPS.....</i>	<i>42</i>
4.1.9.	<i>Tipo de gas protector.....</i>	<i>42</i>
4.1.10	<i>Inspección visual.</i>	<i>42</i>
4.1.11	<i>Registro del WPQ.....</i>	<i>45</i>
5.	ANÁLISIS DE LA MICROESTRUCTURA.....	46
5.1	Solidificación de la soldadura	46
5.1.1	<i>Solidificación inicial del pozo de soldadura</i>	<i>47</i>
5.1.2	<i>Crecimiento competitivo</i>	<i>48</i>
5.1.3	<i>Microestructura</i>	<i>48</i>
5.1.4	<i>Ferrita alotriomórfica</i>	<i>50</i>
5.1.5	<i>Ferrita acicular</i>	<i>50</i>
5.1.6	<i>Ferrita wittmanstätten</i>	<i>51</i>
5.1.7	<i>Microfases.</i>	<i>51</i>
5.1.8	<i>Transformaciones en la fase sólida durante el enfriamiento</i>	<i>52</i>
5.2	Ciclo térmico de la soldadura	52
5.3	<i>Tamaño de grano.....</i>	<i>53</i>
5.4	Caracterización microestructural	57
5.4.1	<i>Desbaste grosero.</i>	<i>57</i>
5.4.2	<i>Desbaste final</i>	<i>57</i>
5.4.3	<i>Pulido.</i>	<i>57</i>
5.4.4	<i>Evaluación de la microestructura del material base</i>	<i>58</i>
5.4.5	<i>Medición de la dureza</i>	<i>58</i>

6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	60
6.1	Conclusiones.....	60
6.2	Recomendaciones	60

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

PLANOS

LISTA DE TABLAS

	Pág.
1	Temperatura mínima de precalentamiento y de interfase.....9
2	Calificación WPS-posiciones de producción de soldaduras calificadas por ensayos de placa, tubo o sección rectangular.....14
3	Calificación WPS-soldaduras de canal CJP: número y tipo de muestras de ensayo y rango de espesor.....15
4	Tipos de juntas presentes en el proyecto.....15
5	Metal base precalificado.....17
6	Composición química del acero A588 – según norma AWS D1.5.....18
7	Composición química del acero ASTM A588 Grado “A” proporcionado por el proveedor.....19
8	Agrupamiento del índice de susceptibilidad en función de hidrogeno difusible “H” y parámetro de composición (carbono equivalente).....22
9	Temperaturas mínimas de precalentamiento y entre pasadas para tres niveles de restricción.....23
10	Designación de ensayo mecánico y cantidad de probetas.....32
11	Muestras de ensayo requeridas.....33
12	Propiedades mecánicas típicas del electrodo E8016-C2.....35
13	Propiedades mecánicas típicas del electrodo E81T1-Ni.....36
14	Posiciones de soldadura de producción calificadas.....38
15	Espesores de producción calificados.....39
16	Características eléctricas de soldeo.....42
17	Tipo de gas protector.....43
18	Ejecución de la soldadura y determinación del número de pases.....44
19	Datos utilizados en la determinación del ciclo térmico de una unión soldada.....53
20	Designación ASTM según el tamaño de grano.....56

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
1 Alambre tubular para proceso de soldadura FCAW.....	6
2 Almacenamiento del alambre tubular.....	6
3 Specification for low-alloy steel electrodes for Flux Cored Arc Welding/AWSA5.29/A5.29M:2010 American National Standard.....	8
4 Cordón de la soldadura donde el ancho y la profundidad exceden el ancho de la cara de la soldadura.....	12
5 Posición de soldadura sobre cabeza 4G.....	12
6 Posiciones de soldaduras según norma ANSI/AWS A 3.0-85.....	14
7 Especificación de procedimiento de soldadura / código de soldadura Estructural acero AWS D1.1/D1.1M:2010.....	16
8 Vista panorámica del puente vehicular “BELLA INDIA” Machala.....	18
9 Arrostramiento puente vehicular “BELLA INDIA”- Machala.....	18
10 Código de soldadura estructural-acero AWS D1.5/ clasificación de zonas del acero.....	20
11 Perfiles de soldadura en junta a tope / código de soldadura estructural-acero AWS D1.1/D1.1M:2010.....	24
12 Perfiles de soldadura de canal juntas de esquinas interior / código de soldadura estructural acero AWS D1.1/D1.1M:2010.....	24
13 Ensayo de doblado guiado con matriz / código de soldadura estructural- acero AWS D1.5/D1.5M:2008.....	26
14 Ensayo alternativo de doblado envolvente guiado con matriz / código de soldadura estructural-acero AWS D1.5/D1.5M:2008.....	26
15 Ensayo alternativo de doblado guiado con rodillos con matriz con expulsión de descarga por parte inferior. / código de soldadura estructural- acero AWS D1.5/D1.5M:2008.....	27
16 Muestras de doblado de cara y raíz / código de soldadura estructural-acero AWS D1.1/D1.1M:2010.....	27
17 Muestras de doblado de lado / código de soldadura estructural-acero AWS D1.1/D1.1M:2010.....	28
18 Muestras de tracción de la sección reducida / AWS D1.1/D1.1M:2010.....	29
19 Muestras de doblado de cara y raíz / código de soldadura estructural-acero AWS D1.1/D1.1M:2010.....	30

20	Designación de electrodo SMAW / código de soldadura estructural-acero AWS D1.5/D1.5M:2008.....	34
21	Composición química del electrodo E8016-C2/ Código AWS D5.5:2008.....	34
22	Composición química del electrodo E81T1-Ni1-H4/ código AWS A5.29/A5.29M:2010.....	35
23	Placa de ensayo para espesor ilimitado-calificación del soldador/código de soldadura estructural-acero AWS D1.1/D1.1M:2010.....	37
24	Placa de ensayo para espesor ilimitado-calificación para posición 4G / soldadura en campo.....	39
25	Pre calentamiento de placa de ensayo entre 140°C – 250°C en campo.....	41
26	Aplicación de la polaridad, voltaje y amperaje tomados en campo.....	41
27	Corte y mecanizado de placa para calificación en campo.....	42
28	Calificación de soldadores en posición 4G.(Izq.)/ probeta soldada (Der.).....	43
29	Ensayo de doblado lateral en espécimen de espesor 1 pulg. [25 mm].....	44
30	Desarrollo de granos columnares.....	46
31	Desarrollo de granos columnares y zona afectada térmicamente ZAT / código de soldadura estructural-acero AWS D1.1/D1.1M:2010.....	47
32	Inicio de solidificación.....	48
33	Crecimiento competitivo de los granos columnares.....	48
34	Relación pozo de soldadura – diagrama hierro carbono.....	49
35	Ferrita alotrópica presente en el pozo de la soldadura.....	50
36	Ferrita acicular.....	50
37	Formación de ferrita wittmanstätten.....	51
38	Microfases.....	52
39	Ciclo térmico de la soldadura.....	53
40	Tamaño de grano.....	54
41	Tamaño de grano según ASTM.....	55
42	Muestra de pozo de soldadura o zona de soldadura.....	58
43	Especimen de placa de acero soldada para doblado/código de soldadura estructural-acero AWS D1.1/D1.1M:2010.....	58
44	Distribución de cargas para ensayo de doblado en placa de acero soldada/ código de soldadura estructural-acero AWS D1.1/D1.1M:2010.....	59

SIMBOLOGÍA

<i>C.E.</i>	Carbono equivalente
<i>Fe₃C</i>	Cementita
<i>α</i>	Ferrita
<i>γ</i>	Austenita
<i>μm</i>	Micras
<i>M</i>	Martensita
<i>A</i>	Austenita
<i>P</i>	Perlita
<i>F</i>	Ferrita
<i>f.W</i>	Ferrita Widmanstatten
<i>MPa</i>	Mega Pascales
<i>N</i>	Número de granos observados / pulg ² a una ampliación de 100x
<i>n</i>	Número de tamaño de grano
<i>Sy</i>	Límite de fluencia

LISTA DE ABREVIACIONES

ASME	American Society of Mechanical Engineers
ASTM	American Society Testing and Material
AWSBCC	American Welding Society
CA	Corriente alterna
CC	Corriente continua
CJP	Junta con penetración completa
FCAW	Soldadura por arco con alambre tubular
GMAW	Soldadura por arco con protección gaseosa
IIW	International Institute of Welding
MB	Metal Base
MIG	Gas de un metal inerte
NTE	Norma técnica ecuatoriana
PF	Pozo de fusión
PJP	Junta con penetración parcial
PQR	Reporte del procedimiento de calificación
SAW	Soldadura por arco sumergido
WPS	Especificación del procedimiento de soldadura
WPQ	Reporte de calificación de soldadores
ZAT	Zona térmicamente afectada
ZF	Zona de fusión
ZGF	Zona de grano fino
ZGG	Zona de grano grueso
ZGM	Zona de grano mixto

LISTA DE ANEXOS

- A** Ensayos de sanidad de soldadura de filete para calificación WPS
- B** Localización de muestra en la placa soldada de ensayo de espesor 1plg. (25mm)
- C** Designación del electrodo tubular según AWS A 5.29
- D** Especificación de procedimientos de soldadura (WPS)
- E** Registro de calificación de soldador WPQ.
- F** Procedimiento seguro de Trabajo

RESUMEN

Se ha creado un procedimiento de soldadura con proceso FCAW para puentes estructurales, con la finalidad fomentar la calidad de construcción en obras de este tipo poniendo especial atención en los parámetros técnicos de la soldadura con acero de baja aleación como es el acero ASTM A588 Gr.A, para lo cual se aplicó el código AWS D1.1 /2010 Y D1.5M/D1.5, y se realizó el análisis de la microestructura post-soldadura; para 2 tipos de muestras (doblado de cara y raíz).

Con estos resultados, el puente denominado “Intercambiador de Bella India” ubicado en el cantón Machala de la provincia del Oro, emplea un ordenado y confiable porcentaje de elementos químicos en la zona afectada por el calor en cada una de sus soldaduras: 3%C, 35% Si, 11% P, 12% S, 1%Ni, seguido de un procedimiento seguro de trabajo que consta de:

Un procedimiento seguro de trabajo para el equipo de protección individual previo a la calificación de soldadores , utilización de arnés de seguridad para soldadura en arriostamiento del puente, trabajos en altura y ubicación de andamios para la verificación de niveles (Camber), manejo de amoladoras para preparación de placas de ensayo e instalaciones eléctricas previo al proceso de soldadura FCAW.

Con el desarrollo de este procedimiento de soldadura se incrementa el límite de fluencia del cordón de soldadura de 530 a 570 N/mm², permitiendo que éste tenga un considerable grado de movimiento (tracción-compresión).

Se recomienda seguir con rigurosidad los parámetros expuestos en el Procedimiento de soldadura, esto se verá reflejado en la calidad de la misma, más aún en el tema del precalentamiento del material base, para alivianar el enfriamiento brusco del material.

ABSTRACT

A Flux Cored Arc Welding process for structural bridges has been created in order to improve the construction quality for this kind of work, by taking into account the welding technical parameters with ASTM A588 low alloy Steel, for this AWS (American Welding Society) D1.1/2010 y D1.5M/D1.5 code was applied as well as the post-welding microstructure analysis for two types of samples (face and root bending). With this results, the bridge known as “Intercambiador de Bella India” which is located in Machala canton El Oro Province, uses an ordered and reliable percentage of chemical elements in the areas affected by heat in each one of the joints: 3%C, 35% Si, 11%P, 12%S, 1%Ni, this, complemented with a safe work procedure which contains:

A safe work procedure for the individual protection equipment before the welder's qualification, use of safety harness for welding the bridge while bracing it, work at height and scaffolds setting to verify the Camber levels, use of grinding machines to prepare test plates and electrical installations before the FCAW welding process.

With the development of this welding process, it was possible to increase the yield strength of the Weld bead from 530 to 570 N/m², allowing a high level of movement (traction-compression).

It is recommended to follow rigidly the parameters shown in the welding process, this will reflect its quality, but even the base material preheating in order to lighten the sudden cooling of the material.

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

Los distintos elementos estructurales, la forma en que se concibe que vaya a trabajar la estructura y el proceso o sistema constructivo dan como resultado conjuntos estructurales claramente tipificados. Están por ejemplo, la técnica para puentes que tuvo su primera aplicación en el puente Rio Peixe, construido en 1930 en el sur de Brasil, con una luz de 60m (PERDOMO, 2011).

También en Sur América se dio un proyecto emblemático, que trata de tres puentes en arco entre la Guaira y Caracas, construidos en 1950. La parte inferior de los arcos empleó el sistema y el tablero se fijó a estribos mediante cables provisionales. A partir de 1987 se comenzaron a mover las pilas del puente debido a una falla geológica, hecho que generó en la estructura una serie de deformaciones y agrietamientos (TENORIO, 2012).

Cada uno de ellos presenta una complejidad distinta durante su cálculo estructural y su proceso constructivo, lo cual a su vez los diferencia de las otras tipologías (PERDOMO, 2011).

En el tema de la soldadura el que a propósito es una rama de la Ingeniería, se realizó gracias a las contribuciones de hombres comunes, hombres que no dudaron en aplicar cada pizca de conocimiento adquirido, cuando era posible para resolver problemas prácticos.

Es difícil obtener una información exacta del perfeccionamiento de la soldadura y de las personas que participaron, porque se estaban efectuando muchos experimentos y técnicas de soldadura en diferentes países. Aunque el trabajo de los metales y la unión de los mismos datan de siglos atrás, tal parece que la soldadura como la conocemos en

la actualidad, hizo su aparición alrededor del año 1900.

La historia de la soldadura no estaría completa sin mencionar las contribuciones realizadas por los antiguos metalúrgicos. Existen manuscritos que detallan el hermoso trabajo en metales realizado en tiempo de los faraones de Egipto, en el Antiguo testamento se menciona frecuentemente el trabajo en metal. En el tiempo del imperio Romano ya se habían desarrollado varios procesos, entre los principales esta la forja (METALOGRAFÍA, 2012).

En la actualidad se conoce de varios procesos de soldadura entre ellos por arco con alambre tubular (FCAW), éste es un proceso que al aplicarlo en distintos campos y aceros, se torne necesario que se plasme en un documento las variables que tienen que están relacionadas directamente con la calidad de la soldadura, entre ellas están: la compatibilidad entre el material de la soldadura y los metales bases seleccionados, propiedades metalúrgicas, diseños de juntas, cargas, entre otras.

1.2 Justificación

El WPS es un documento que relaciona las variables a considerar en la realización de una soldadura específica, determina la ejecución de las pruebas de calificación tanto en el proceso como en el procedimiento de la persona que realiza dicha soldadura, involucra todas las variables.

Las variables esenciales son aquellas que en las cuales se presentan cambios por lo que se considera que afecta las propiedades mecánicas de la soldadura pues requieren de recalificación.

Las variables suplementarias son aquellas que por requerimiento de otras secciones del código, requieren pruebas de impacto además se debe considerar que las variables esenciales como las suplementarias varían de un proceso a otro.

A medida que transcurre el tiempo va tomando mayor importancia y demanda en nuestro medio, pues se requiere que las soldaduras ejecutadas en una amplia variedad de aplicaciones de la ingeniería Industrial cumplan con los requisitos del código de

calificación vigente; para de esta forma, alcanzar estándares de calidad convenientes debiéndose tener en cuenta que dicho código debe elegirse de acuerdo a los diferentes tipos de esfuerzos a los que estará expuesta la soldadura, de igual manera las características del material bases.

En consecuencia se realiza una guía basada en las especificaciones de soldadura a través de los fundamentos técnicos descritos en los códigos AWS D1.1:2010 y D1.5M/D1.5.

La reparación de una soldadura ha sido denominada como un procedimiento inevitable, siempre que se encuentre un defecto en la misma. El procedimiento a seguir para las reparaciones depende del grado de accesibilidad, por lo que en un principio se debe seguir con rigurosidad el procedimiento de soldadura y de esta manera ser más productivos.

Según el Journal of Engineering, en su artículo describe el fortalecimiento de un puente dañado de vigas de acero, a través de la soldadura de reparación de reemplazo, llevándose a cabo las respectivas pruebas de carga en campo tanto, durante como después de la soldadura y sus resultados fueron deficientes, por lo que esta investigación se centra en realizar un procedimiento de la calidad de soldadura mediante la aplicación de los códigos AWS D1.1:2010 y D1.5M/D1.5, en puentes estructurales y análisis de la microestructura post-soldadura.

El resultado de esta investigación beneficiará a los clientes internos (personal involucrado en el proceso de fabricación del área de estructuras: soldadores, fabricantes, supervisores, inspectores, entre otros) y externos (cliente final de cada proyecto) siendo el último su principal mercado, está claro que la empresa debe garantizar el 100% de calidad de la soldadura y con esto otorgar a los clientes un margen de seguridad de su trabajo.

El proyecto de construcción de puentes vehiculares en la Provincia del Oro, Cantón Machala, Km ½ Bella India, contribuye al desarrollo social de la zona ,tomando en cuenta la presencia del Puerto Bolívar, actividades de agricultura y ganadería permitiendo el libre acceso de bienes y servicios mejorando así la calidad de vida de los pobladores y toda actividad económica.

1.2 Objetivos

1.3.1 Objetivo general. Desarrollar un procedimiento de soldadura con proceso FCAW, mediante la aplicación del código AWS d1.1 /2010 y D1.5M/D1.5 en puentes estructurales y análisis de la microestructura post-soldadura

1.3.2 Objetivos específicos:

Elaborar las especificaciones del procedimiento de soldadura para puentes estructurales.

Aplicar las especificaciones de los códigos AWS D1.1:2010 y D1.5M/D1.5 en el procedimiento de soldadura para puentes estructurales.

Determinar todos los requisitos visuales y mecánicos de las probetas para asegurar la calidad de la soldadura.

Calificar a las personas que van a realizar dicho procedimiento (soldadores).

Analizar la microestructura post-soldadura.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Soldadura por arco con alambre tubular (FCAW)

La soldadura de arco de núcleo fundente FCAW (Flux Cored Arc Welding), es muy parecida a la soldadura MIG/MAG (GMAW) en cuanto tiene que ver con el manejo y ubicación de las partes. Sin embargo, el electrodo continuo no es sólido si no que está constituido por un tubo metálico hueco que rodea al núcleo, relleno de flux.

Este alambre nucleado, es más costoso que el alambre sólido estándar y puede generar humos y/o escoria, pero permite incluso una velocidad más alta de soldadura y mayor penetración del metal (WEMAN, 2003).

Esta forma de soldeo es capaz de combinar características de tres procedimientos de soldadura conocidos:

- Soldadura Manual con Electrodo Revestido (SMAW).
- Soldadura en Atmósfera de Gases Protectores (GMAW).
- Soldadura Automática por Arco Sumergido (SAW).

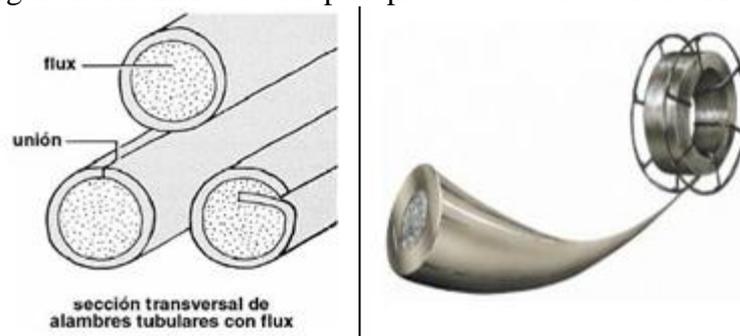
Su desarrollo comenzó con la introducción en 1953 del procedimiento de soldadura con varilla maciza protegida por CO₂ y afianzó su utilización en 1956 con la introducción de los hilos tubulares sin necesidad de gas protector (auto protegidos). Ya en la mitad de los años 60 estaban desarrollados los hilos tubulares con y sin protección gaseosa obteniéndose con ellos depósitos limpios con buenas propiedades mecánicas (RODRIGUEZ, 2004).

2.1.1 Alambre tubular. Los alambres tubulares son continuos electrodos afines a los manejados en la soldadura GMAW, con el contraste de que constan de agujeros y en su interior que contienen un fundente de características y funciones similares a las del electrodo revestido y la cantidad de fundente varía de un 15 a un 35% en peso.

Como en la soldadura MIG/MAG, el proceso de soldadura con hilos tubulares depende

de un gas de protección, para proteger la zona soldada de la contaminación atmosférica. El gas puede ser aplicado o bien de forma separada, en cuyo caso el hilo tubular se denomina de protección gaseosa, o bien, se genera por la descomposición de los elementos contenidos en el flux, en cuyo caso se habla de hilos tubulares auto-protegidos. Además del gas de protección, el núcleo de flux produce una escoria que protege al metal depositado en el enfriamiento. Posteriormente se elimina la escoria.

Figura 1. Alambre tubular para proceso de soldadura FCAW



Fuente: Autor

2.1.1.1 Condiciones de almacenamiento del alambre tubular. Las condiciones de almacenaje para alambres tubular son similares a los electrodos revestidos usados en el proceso SMAW. Los alambres con núcleo fundente son envasados en bolsas plásticas que contienen un desecante que protege al alambre de absorber humedad del ambiente. Los cartones deben protegerse del daño que produce el agua. Por su parte las etiquetas jamás deben retirarse de su envase. Las partes restantes de alambres deben almacenarse en contenedores cerrados con la presencia de un desecante o en su defecto calentado a una temperatura de 6 a 8 grados Celsius por sobre la temperatura ambiente o ambos (INDURA, 2009).

Figura 2. Almacenamiento del alambre tubular



Fuente: Autor

2.1.1.2 *Periodos de tiempos atmosféricos aprobados.* Periodos de tiempos atmosféricos aprobados. Estos electrodos no deben usarse a combinaciones de humedad relativa-temperatura que excedan la humedad relativa o el contenido de humedad en el aire que predominó durante el programa del ensayo. Cualquier cuadro psicrométrico estándar, debe usarse para la determinación de los límites de temperatura-humedad relativa (AWS, 2010).

2.1.1.3 *Periodos de tiempo de exposición atmosférica alternativos establecidos por ensayos.* Los Alambres tubulares han sido fabricados para asegurar los niveles requeridos de los diferentes elementos químicos en el material a soldar. El secado del hilo no es necesario antes de soldar siempre y cuando haya sido almacenado y manipulado conforme a estas recomendaciones. Mientras se está trabajando, se recomienda limitar la exposición de la bobina al ambiente a un máximo de 8 horas en el caso de los alambres tubulares.

2.1.2 *Procedimientos para la soldadura por arco con alambre tubular (FCAW).* La soldadura por arco con núcleo de fundente (flux cored arc welding, FCAW) es un proceso de soldadura por arco que aprovecha un arco entre un electrodo continuo de metal de aporte y el charco de soldadura. Este proceso se emplea con protección de un fundente contenido dentro del electrodo tubular, con o sin un escudo adicional de gas de procedencia externa, y sin aplicación de presión.

El electrodo con núcleo de fundente es un electrodo tubular de metal de aporte compuesto que consiste en una funda metálica y un núcleo con diversos materiales pulverizados. Durante la soldadura, se produce un manto de escoria abundante sobre la superficie de la franja de soldadura.

El aspecto que distingue al proceso FCAW de otros procesos de soldadura por arco es la inclusión de ingredientes fundentes dentro de un electrodo de alimentación continua. Las notables características de operación del proceso y las propiedades de la soldadura resultante se pueden atribuir al empleo de este tipo de electrodo (MELO, 2013).

2.1.2.1 *Diámetro máximo de alambre.* Los electrodos se catalogan según si estos disponen de autoprotección o necesitan de dióxido de carbono como gas protector de

aporte, número de pases de acuerdo al tipo de junta, la composición química y el metal de aporte previo a cualquier tratamiento.

Los electrodos se diseñan de manera que se depositen metales con las composiciones químicas y propiedades mecánicas ligadas a la especificación vigente. Éste tipo de electrodos tubulares se producen en tamaños estándar con diámetros desde 1,2 mm a 4,0 mm (0,045 a 5/32), aunque puede existir tamaños especiales.

Las propiedades de soldadura pueden variar considerablemente obedeciendo al tamaño del electrodo, el amperaje, el espesor de las chapas, la geometría de la junta, la composición química del material base, el gas protector (de ser necesario). Algunos electrodos se diseñan para soldar en posición plana y horizontal, algunos electrodos con diámetros menores a 2,4mm (3/32) pueden servir para soldar fuera de posición si es una corriente de soldadura baja dentro del intervalo del fabricante. Según la norma AWS A5.29/A5.29M:2010 se distinguen 2 tipos de electrodos de acero para el proceso FCAW.

Figura 3: Specification for Low-Alloy Steel Electrodes for Flux Cored Arc Welding/AWSA5.29/A5.29M:2010 An American National Standard

E81T1-Ni1		E81T1-Ni2
<p>Es un alambre que se aplica en toda posición, diseñado para uso con CO₂ como gas de protección, contiene alrededor de 1% de níquel. Presenta una excelente soldabilidad muy buena apariencia del depósito, poca salpicadura, arco estable y una fácil remoción de escoria, tiene buena resistencia al impacto en bajas temperaturas (-30°C). Se usa en estructuras de puentes, estanques de almacenamiento, maquinaria de movimiento de tierra en minería y construcción.</p>	<p>Presentación Diámetros (mm.) 1.2-1.6 Carrete Plástico 15 Kg. Norma AWS A 5.29</p>	<p>Es un alambre que se aplica en toda posición, diseñado para uso con 100 % CO₂ como gas de protección, contiene alrededor de 2.5 % de níquel. Presenta una excelente soldabilidad muy buena apariencia del depósito, poca salpicadura, arco estable y una fácil remoción de escoria, tiene buena resistencia al impacto en bajas temperaturas (-40°C). Se usa en estructuras de puentes, estanques de almacenamiento, maquinaria de movimiento de tierra minería y construcción.</p>

Fuente: Características del fabricante-Indura

1) **Espesor máximo de las capas posteriores de las soldaduras de raíz de canal y de filete:**

- 1/8 pulg. [3 mm] para las capas posteriores de las soldaduras realizadas en la posición plana.

- 3/16 pulg. [4 mm] para las capas posteriores de las soldaduras realizadas en las posiciones verticales, de arriba u horizontal.

2.2 Requerimientos generales de WPS

2.2.1 *Requerimientos de soldadura vertical ascendente.* La progresión para todos los pases en soldadura en posición vertical debe ser ascendente, con las siguientes excepciones:

- La socavación puede repararse verticalmente de manera descendente cuando el precalentamiento esté en conformidad con la tabla 1, pero no menor de 70°F [20°C].
- Cuando los elementos son soldados con alambre tubular, la progresión de la soldadura vertical puede ser ascendente o descendente, pero solo en la dirección(es) en la(s) que el soldador esté calificado (AWS, 2010).

Tabla 1. Temperatura mínima de precalentamiento y de interfase

C a t e g o r í a	Especificación de Acero		Proceso de soldadura	Espesor de la Sección más Gruesa en el Punto de Soldadura		Temperatura Mínima de Precalentamiento y de Interfase	
				pulg.	Mm	°F	°C
A	ASTM A 36	Grado B	SMAW con electrodos diferentes a los bajo hidrógeno	1/8 a 3/4 incl.	3 a 20 incl.	32 ^a	0 ^a
	ASTM A 53	Grado B					
	ASTM A 106	Grados A, B, CS, D, DS, E					
	ASTM A 131	Grado B					
	ASTM A 139	Grado Y35					
	ASTM A 381	Grado A					
	ASTM A 500	Grado B					
		Grado C					
	ASTM A 501						
	ASTM A 516						
ASTM A 524	Grados I & II	Más de 3/4 por 1-1/2 incl.	Más de 20 por 38 incl.	150	65		
ASTM A 573	Grado 65	Más de 1-1/2 por 2-1/2 incl.	Más de 38 por 65 incl.	225	110		
ASTM A 709	Grado 36						
ASTM A 1008 SS	Grado 30						
	Grado 33 Tipo 1						
ASTM A 1011 SS	Grado 40 Tipo 1	Más de 2-1/2	Más de 65	300	150		
	Grado 30						
	Grado 33						
	Grado 36 Tipo 1						
	Grado 40						
	Grado 45						
	Grado 50						
	Grado 55						
API 5L	Grado B						
	Grado X42						
ABS	Grados A, B, D, CS, DS						
	Grado E						

Tabla1. (Continuación)

ASTM A 36 ASTM A 53 ASTM A 106 ASTM A 131	Grado B Grado B Grados A, B, CS, D, DS, E AH 32 & 36 DH 32 & 36 EH 32 & 36		1/8 a 3/4 incl.	3 a 20 incl.	32 ^a	0 ^a
ASTM A 139 ASTM A 381 ASTM A 441 ASTM A 500	Grado B Grado Y35	SMAW con otros electrodos bajos en hidrogeno SAW, GMAW, FCAW	Más de 3/4 por 1-1/2 incl.	Más de 20 por 38 incl.	50	10
ASTM A 501 ASTM A 516	Grado A Grado B Grado C		Más de 1-1/2 por 2-1/2 incl.	Más de 38 por 65 incl.	150	65
ASTM A 524 ASTM A 529 ASTM A 537 ASTM A 572 ASTM A 573	Grados 55 & 60 65 & 70 Grados I & II Grados 50 & 55 Clases 1 & 2 Grados 42, 50, 55 Grado 65		Más de 2-1/2	Más de 65	225	110
ASTM A 588						
ASTM A 595 ASTM A 606 ASTM A 618 ASTM A 633	Grados A, B, C					
ASTM A 709	Grados Ib, II, III Grados A, B Grados C, D Grados 36, 50, 50S, 50W, HPS 50W					
ASTM A 710	Grado A, Clase 2 (>2 pulg. [50 mm])					
ASTM A 808 ASTM A913 ^P ASTM A 992 ASTM A 1008 HSLAS	Grado 50					
ASTM A 1008 HSLAS-F ASTM A 1011 HSLAS	Grado 45 Clase 1 Grado 45 Clase 2 Grado 50 Clase 1 Grado 50 Clase 2 Grado 55 Clase 1 Grado 55 Clase 2 Grado 50		1/8 a 3/4 incl.	3 a 20 incl.	32 ^a	0 ^a
ASTM A 1011 HSLAS-F ASTM A 1018 HSLAS	Grado 45 Clase 1 Grado 45 Clase 2 Grado 50 Clase 1 Grado 50 Clase 2 Grado 55 Clase 1 Grado 55 Clase 2 Grado 50	SMAW Con electrodos bajos en hidrogeno SAW, GMAW, FCAW	Más de 3/4 hasta 1-1/2 incl.	Más de 20 hasta 38 incl.	50	10
ASTM A 1018 HSLAS-F	Grado 45 Clase 1 Grado 45 Clase 2 Grado 50 Clase 1 Grado 50 Clase 2 Grado 55 Clase 1 Grado 55 Clase 2		Más de 1-1/2 hasta 2-1/2 incl.	Más de 38 hasta 65 incl.	150	65
ASTM A 1018 HSLAS-F ASTM A 1018 SS	Grado 45 Clase 1 Grado 45 Clase 2 Grado 50 Clase 1 Grado 50 Clase 2 Grado 55 Clase 1 Grado 55 Clase 2 Grado 50 Grado 30 Grado 33 Grado 36 Grado 40 Grado B Grado X42		Más de	Más de 65	225	110
API 5L	Grados 42, 50 <u>Grado 50</u>					
API Spec. 2H API 2MT1 API 2W API 2Y ABS	Grados 42, 50, 50T Grados 42, 50, 50T Grados AH 32 & 36 DH 32 & 36 EH 32 & 36					
ABS	Grados A, B, D, CS, DS					

Tabla 1. (Continuación)

C	ASTM A 572 ASTM A 633 ASTM A 913 ^a ASTM A 710	Grados 60, 65 Grado E Grados 60, 65 Grado A, Clase 2 (<2 pulg. [50 mm])	SMAW con electrodos bajos en hidrógeno SAW, GMAW, FCAW	1/8 a 3/4 incl.	3 a 20 incl.	50	10
	ASTM A 710	Grado A, Clase 3 (>2 pulg. [50 mm])		Sobre 3/4 hasta 1-1/2 incl.	Sobre 20 hasta 38 incl.	150	65
	ASTM A 709 ^c ASTM A 852 ^c	Grado HPS70W		Sobre 1-1/2 hasta 2-1/2 incl.	Sobre 38 hasta 65 incl.	225	110
	ASTM A 1018 HSLAS HSLAS-F API 2W	Grado 60 Clase 2 Grado 70 Clase 2 Grado 70 Clase 2 Grado 60		Sobre 2-1/2	Sobre 65	300	150
D	ASTM A 710 ASTM A 913 ^b	Grado A (Todas las clases) Grados 50, 60, 65	SMAW, SAW, GMAW, y FCAW con electrodos o combinaciones de fundente y electrodo capaces de depositar material de soldadura con un contenido máximo de hidrógeno difusible de 8ml/100 g (H8)	Todos los espesores > 1/8 pulg. [3 mm]		32 ^a	0 ^a

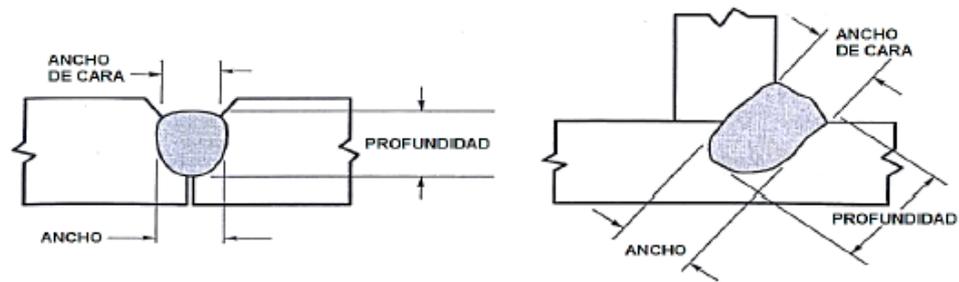
Fuente: Código de Soldadura Estructural-Acero AWS D1.1/D1.1M:2010

- 1) Cuando la temperatura del metal sea menor de 32°F [0°C], el metal de base tiene que estar precalentado a un mínimo de 70°F [20°C], y la temperatura mínima de interpase debe ser constante durante el transcurso de la soldadura.
- 2) Las limitaciones de aporte de calor según el numeral 5.7 del Código AWS D1.1/D1.1M:2010 no aplican al ASTM A 913.
- 3) Para el ASTM A 709 Grado HPS70W y ASTM A 852, la temperatura máxima de precalentamiento y de interpase no deben sobrepasar los 400°F [200° C] para un espesor hasta 1-1/2 in [40 mm], inclusivo, 450 °F [230 C] para espesores mayores (AWS, 2010).

2.2.2 *Limitación anchura/profundidad del pase.* Ni la profundidad ni la anchura máxima en la sección transversal del metal de soldadura depositado en cada pase de soldadura deben exceder la anchura de la superficie del pase de soldadura (ver figura4)

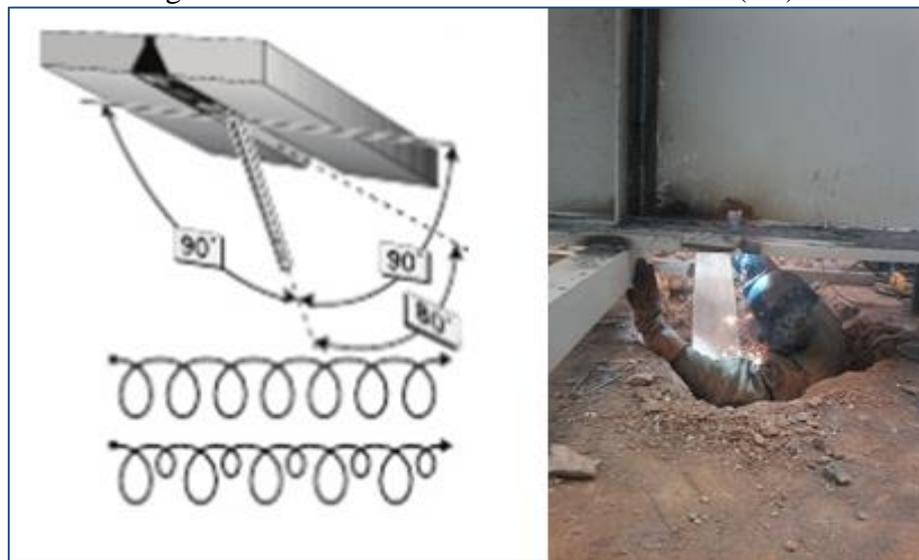
2.2.3 *Requerimientos de soldadura sobre cabeza.* Es indispensable que la corriente este regulada de forma que no resulte un baño demasiado fluido pero suficiente para que permitir una buena penetración. El arco debe ser muy corto y si fuese necesario hacer alguna fuga en adelante para dar tiempo al baño para solidificarse (ver figura5).

Figura 4: Cordón de la soldadura donde el ancho y la profundidad exceden el ancho de la cara de la soldadura.



Fuente: Código de Soldadura Estructural-Acero AWS D1.1/D1.1M:2010

Figura 5: Posición de soldadura sobre cabeza (4G)



Fuente: Autor

CAPÍTULO III

3. CALIFICACIÓN DE PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA

3.1 Requerimientos generales

Los requerimientos para los ensayos de calificación del WPS y personal de soldadura (definidos como soldadores), los mismos que se describen a continuación (AWS, 2010).

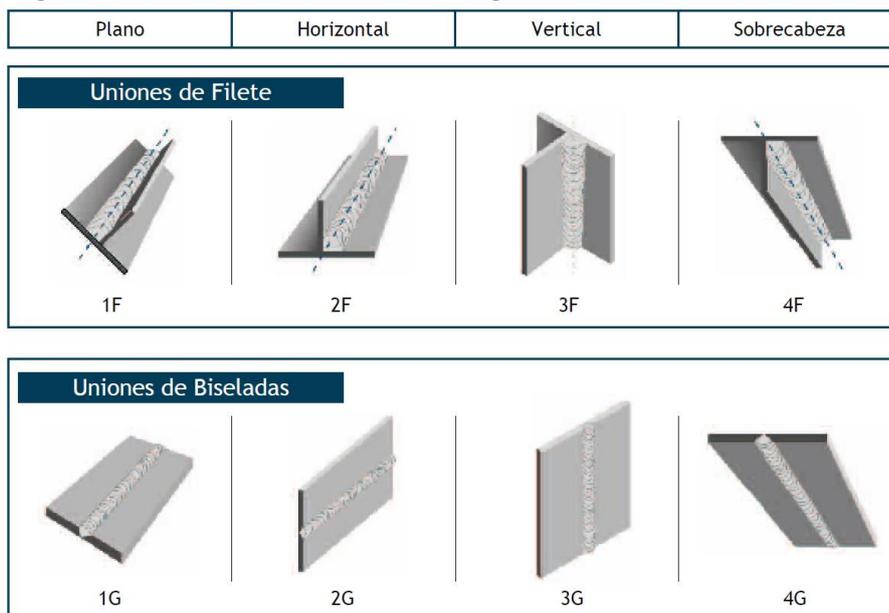
3.1.1 *Especificación y periodo de efectividad.* La calificación de un soldador o de un operador de soldadura como se especifica en el código AWS D1.1/D1.1M:2010, debe considerarse como que permanece en efecto indefinidamente a menos que el soldador no esté dedicado por un periodo de más de seis meses o a un proceso de soldadura dado por el cual el soldador u operador de soldadura esté calificado o a menos que exista alguna razón específica para cuestionar la habilidad de un soldador u operador de soldadura (AWS, 2010).

3.1.2 *Requerimientos comunes para WPS y calificación de desempeño del personal de soldadura.* Las calificaciones que fueron que realizadas y que cumplieron con los requerimientos de ediciones previas de AWS D1.1 o AWS D1.0 o AWS D2.0, mientras esas ediciones estaban en vigencia, son válidas y puede utilizarse.

El uso de ediciones previas debe prohibirse para nuevas calificaciones en lugar de las ediciones vigentes, a menos de que la específica edición previa se detalle en los documentos del contrato (AWS, 2010).

- 1) *Registros.* Los registros de los resultados de ensayo debe guardarlos el fabricante o Contratista y poner a disponibilidad de las personas autorizadas para revisarlos (AWS, 2010).
- 2) *Posiciones de las soldaduras para la producción.* Todas las soldaduras deben calificarse como planas (F), horizontales (H), verticales (V) y sobrecabeza (OH) de conformidad con las definiciones mostradas en la figura 6.

Figura 6: Posiciones de soldaduras según norma ANSI/AWS A 3.0-85



Fuente: Código de Soldadura Estructural-Acero AWS D1.1/D1.1M:2010

3.2 Especificación del procedimiento de soldadura (WPS).

A excepción de los WPS precalificados, un WPS para uso en soldadura de producción debe calificarse en conformidad con los requerimientos generales y el desempeño del personal de soldadura (AWS, 2010).

3.2.1 Posiciones de soldadura de producción calificadas. Las posiciones de soldadura de producción calificadas por un WPS deben ser de conformidad con los requerimientos.

Tabla 2. Calificación WPS-posiciones de producción de soldaduras calificadas por ensayos de placa, tubo o sección rectangular

Ensayo de Calificación	Soldadura de Placa Calificada para Producción					Soldadura de Tubo Calificada para Producción					Soldadura de Sección Rectangular Calificada para Producción				
	Tipo de Soldadura	Posiciones	de Canal	de Canal	Filete ¹	Junta a Tope		T-, Y-, K- Conexiones		Filete ³	Junta a Tope		T-, Y-, K- Conexiones		Filete ³
			CJP	PJP		CJP	PJP	CJP	PJP		CJP	PJP			
P L A C A	CJP de Canal ^a	1G	F	F	F	F	F			F	F ₁	F			F
		2G	F, H	F, H	F, H	(F, H) ^b	(F, H) ^b			F, H	F, H	F, H			F, H
		3G	V	V	V	v ^b	v ^b			V	V	V			V
		4G	OH	OH	OH	OH ^b	OH ^b			OH	OH	OH			OH
	Filete ^a	1F			F					F					F
		2F			F, H					F, H					F, H
		3F			V					V					V
		4F			OH					OH					OH

Fuente: Código de Soldadura Estructural-Acero AWS D1.1/D1.1M:2010

3.2.2 Tipo de ensayo de calificación. El tipo y cantidad de ensayos de calificación necesarios para calificar un WPS para un espesor dado, diámetro o ambos, deben estar en conformidad a la siguiente tabla (CJP).

Tabla 3. Calificación WPS-soldaduras de canal CJP: número y tipo de muestras de ensayo y rango de espesor.

Espesor nominal de chapa para ensayo,mm	Cantidad de probetas				Espesor nominal calificado en chapa	
	Tracción con la probeta de sección reducida	Doblado de raíz	Doblado de cara	Doblado lateral	Mín. (Pulg.)	Máx. (Pulg.)
$3 \leq T \leq 10$	2	2	2	-	1/8	2T
$10 \leq T \leq 25$	2	-	-	4	1/8	2T
25 y mayor	-	1	1	1	1/8	Ilimitado

Fuente: Código de soldadura estructural-acero AWS D1.1/D1.1M:2010

En el Anexo A, se puede apreciar el espesor tanto del patín superior e inferior el cual consta de 25mm, que según la tabla 3 está en el rango de $3/8 < T < 1$. Por lo que se efectuara 2 pruebas de tracción con probeta de sección reducida.

3.2.3 Tipo de soldadura para calificación del WPS. Para el propósito de calificación del WPS, los tipos de soldadura deben clasificarse como sigue:

Tabla 4. Tipos de juntas presentes en el proyecto

Tipos de soldadura	Tipos de conexiones			
	Tubular	No tubular	T, Y y K	Juntas a tope
CJP		X		
PJP		X		
Filete	X	X		
CJP	X			
PJP	X		X	X
Soldaduras de tapón y de ojal	X	X		

Fuente: Código de Soldadura Estructural-Acero AWS D1.1/D1.1M:2010

Para nuestro estudio se determina el tipo de soldadura CJP y de filete no tubular (según anexo A), es decir al momento de soldar en campo la viga del Tipo "I" se presentan este tipo de soldaduras de acuerdo a las diferentes posiciones.

3.2.4 Preparación de WPS. El fabricante o contratista debe preparar un WPS escrito que especifique todas las variables esenciales aplicables tales como material base, diseño de junta ,posición, espesor de pared, metal de aporte, características eléctricas, tiempo entre pases, dirección de la soldadura, gas protector, fundente de protección, velocidad de avance, precalentamiento.

Figura 7. Especificación de procedimiento de soldadura

ESPECIFICACIÓN DE PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA (WPS) Sí
PRECALIFICADO _____ CUALIFICADO POR ENSAYO _____
O RECORDS DE CUALIFICACIÓN DE PROCEDIMIENTO (PQR) Sí

Nombre de la Compañía _____
 Proceso(s) de Soldadura _____
 Número(s) PQR de Soporte _____

Número de Identificación _____
 Revisión _____ Fecha _____ Por _____
 Autorizado por _____ Fecha _____
 Tipo—Manual Semiautomático
 Máquina Automático

DISEÑOS DE JUNTA UTILIZADO
 Tipo: _____
 Individual Doble Soldadura
 Refuerzo: Sí No
 Material de Refuerzo: _____
 Abertura de Raíz _____ Dimensión de Cara de Raíz _____
 Ángulo de Canal _____ Radio (J-U) _____
 Remoción de Raíz: Sí No Método _____

METALES DE BASE
 Especificación de Material _____
 Tipo o Grado _____
 Espesor: De Canal _____ Filete _____
 Diámetro (Tubo) _____

METALES DE APORTE
 Especificación AWS _____
 Clasificación AWS _____

PROTECCIÓN
 Fundente _____ Gas _____
 Composición _____
 Electrodo-Fundente (Clase) _____ Tasa de Flujo _____
 Tamaño de Copa de Gas _____

PRECALENTAMIENTO
 Temp. Min. de Precalentamiento _____
 Temp. Min. de Interpase _____ Max. _____

POSICIÓN
 Posición de Canal: _____ Filete: _____
 Progresión Vertical: Arriba Abajo

CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS
 Modo de Transferencia (GMAW) Corto-Circuito
 Globular Rocío
 Corriente: AC DCEP DCEN Pulsada
 Fuente de Alimentación: CC CV
 Otro _____
 Electrodo de Tungsteno (GTAW)
 Tamaño: _____
 Tipo: _____

TÉCNICA
 Cordón Estrecho u Ondulado: _____
 Multipase o Pase Individual (por lado) _____
 Número de Electrodos _____
 Separación de Electrodos Longitudinal _____
 Lateral _____
 Ángulo _____
 Tubo de Contacto a Distancia de Trabajo _____
 Martilleo _____
 Limpieza de Interpase _____

TRATAMIENTO POST-SOLDADURA
 Temperatura _____
 Tiempo _____

PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA

Pase o Capa(s) de Soldadura	Proceso	Metales de Aporte		Corriente		Voltios	Velocidad de Recorrido	Detalles de Junta
		Clase	Diámetro	Tipo y Polaridad	Amperios o Velocidad de Alimentación de Alambre			

Fuente: Código de Soldadura Estructural-Acero AWS D1.1/D1.1M:2010

3.2.5 Calificación del metal base. Los WPS que requieren de una calificación que use los metales base se puede verificar en la siguiente tabla.

Tabla 5. Metal base precalificado

G r u p o	Requerimientos de la Especificación de Acero				
	Especificación de Acero	Mínima Resistencia a La Fluencia		Rango de Tracción	
		ksi	MPa	ksi	MPa
	ASTM A 36	(>3/4 pulg. [20 mm])	36	250	58–80 400–550
	ASTM A 131	Grados AH32, DH32, EH32	46	315	64–85 440–590
		Grados AH36, DH36, EH36	51	355	71–90 490–620
	ASTM A 441		40–50	275–345	60–70 415–485
	ASTM A 516	Grado 65	35	240	65–85 450–585
		Grado 70	38	260	70–90 485–620
	ASTM A 529	Grado 50	50	345	70–100 485–690
		Grado 55	55	380	70–100 485–690
	ASTM A 537	Clase 1	45–50	310–345	65–90 450–620
	ASTM A 572	Grado 42	42	290	60 min. 415 min.
		Grado 50	50	345	65 min. 450 min.
		Grado 55	55	380	70 min. 485 min.
	ASTM A 588 ^b	(4 pulg. [100 mm] y menos)	50	345	70 min. 485 min.
	ASTM A 595	Grado A	55	380	65 min. 450 min.
		Grados B y C	60	410	70 min. 480 min.
	ASTM A 606 ^b		45–50	310–340	65 min. 450 min.
	ASTM A 618	Grados Ib, II, III	46–50	315–345	65 min. 450 min.
II	ASTM A 633	Grado A	42	290	63–83 430–570
		Grados C, D	50	345	70–90 485–620
		(2-1/2 pulg. [65 mm] y menos)			
	ASTM A 709	Grado 36 (>3/4 pulg. [20 mm])	36	250	58–80 400–550
		Grado 50	50	345	65 min. 450 min.
		Grado 50W	50	345	70 min. 485 min.
		Grado 50S	50–65	345–450	65 min. 450 min.
		Grado HPS 50W ^b	50	345	70 min. 485 min.
	ASTM A 710	Grado A, Clase 2 >2 pulg. [50 mm]	50–55	345–380	60–65 415–450
	ASTM A 808	(2-1/2 pulg. [65 mm] y menos)	42	290	60 min. 415 min.
	ASTM A 913	Grado 50	50	345	65 min. 450 min.
	ASTM A 992		50–65	345–450	65 min. 450 min.
	ASTM A 1008 HSLAS	Grado 45 Clase 1	45	310	60 min. 410 min.
		Grado 45 Clase 2	45	310	55 min. 380 min.
		Grado 50 Clase 1	50	340	65 min. 450 min.
		Grado 50 Clase 2	50	340	60 min. 410 min.
		Grado 55 Clase 1	55	380	70 min. 480 min.
		Grado 55 Clase 2	55	380	65 min. 450 min.
	ASTM A 1008 HSLAS-F	Grado 50	50	340	60 min. 410 min.

Fuente: Código de soldadura estructural-acero AWS D1.1/D1.1M:2010

Según la tabla 5, detalla el tipo de Acero recomendado por el proyectista ASTM -A 588, de igual manera el espesor de 25mm que recomienda se encuentra dentro del rango sugerido por la AWS (ver anexo A).

3.2.5.1 Requerimientos de acero Cor-ten ASTM-A 588. Este tipo de acero ha sido recomendado por el diseñador, por su resistencia a las condiciones ambientales, este efecto se produce debido a su mayor contenido de cobre, permitiendo tener una buena opción de acero estructural para la construcción de puentes.

Figura 8. Vista panorámica del puente vehicular “BELLA INDIA”- Machala



Fuente: Autor

Figura 9. Arrostramiento puente vehicular “BELLA INDIA”- Machala



Fuente: Autor

3.2.5.2 Composición química del acero cor-ten ASTM -A 588. Según la ASTM (American Society for Testing and Materials) aprobó en el año de 1979 la composición química de este tipo de acero. Ver Tabla 6

Tabla 6. Composición química del acero A588 – según norma AWS D1.5

Element	Composition, %								
	Grade A	Grade B	Grade C	Grade D	Grade E	Grade F	Grade G	Grade H	Grade J
Carbon	0.19 max	0.20 max	0.15 max	0.10-0.20	0.15 max	0.10-0.20	0.20 max	0.20 max	0.20 max
Manganese	0.80-1.25	0.75-1.25	0.80-1.35	0.75-1.25	1.20 max	0.50-1.00	1.20 max	1.25 max	0.60-1.00
Phosphorus	0.04 max	0.04 max	0.04 max	0.04 max	0.04 max	0.04 max	0.04 max	0.035 max	0.04 max
Sulfur	0.05 max	0.05 max	0.05 max	0.05 max	0.05 max	0.05 max	0.05 max	0.040 max	0.05 max
Silicon	0.30-0.65	0.15-0.30	0.15-0.30	0.50-0.90	0.30 max	0.30 max	0.25-0.70	0.25-0.75	0.30-0.50
Nickel	0.40 max	0.50 max	0.25-0.50	...	0.75-1.25	0.40-1.10	0.80 max	0.30-0.60	0.50-0.70
Chromium	0.40-0.65	0.40-0.70	0.30-0.50	0.50-0.90	...	0.30 max	0.50-1.00	0.10-0.25	...
Molybdenum	...	...	...	...	0.08-0.25	0.10-0.20	0.10 max	0.15 max	...
Copper	0.25-0.40	0.20-0.40	0.20-0.50	0.30 max	0.50-0.80	0.30-1.00	0.30-0.50	0.20-0.35	0.30 min
Vanadium	0.02-0.10	0.01-0.10	0.01-0.10	...	0.05 max	0.01-0.10	...	0.02-0.10	...
Zirconium	...	...	...	0.05-0.15	...	...	...	...	...
Columbium	...	...	...	0.04 max	...	...	...	...	...
Titanium	...	...	...	...	...	...	0.07 max	0.005-0.030	0.03-0.05

Fuente: Código de soldadura estructural-acero para Puentes AWS D1.5M/D1.5

Tabla 7. Composición química del acero ASTM A588 Grado “A” proporcionado por el proveedor

Acero ASTM A588 Grado A							
C	Mn	Si	Cr	V	Mo	Ni	Cu
0,17	0,98	0,36	0,5	0,038	0,02	0,33	0,36

Fuente: Proveedor de origen Chino

3.2.5.3 Temperatura de precalentamiento e interpase. La calidad de la soldadura radica en el precalentamiento, el cual consiste en calentar el metal base a una temperatura relativamente baja antes de empezar con la soldadura, el objetivo es disminuir la velocidad de enfriamiento de la zona soldada, es decir reduce la diferencia de temperatura entre la zona de soldadura y el resto de la pieza. Como consecuencia la evacuación de calor es más lenta por lo que estrecha la posibilidad de formación de martensita en la zona de soldadura.

El primer paso a seguir es, hallar el valor de temperatura de precalentamiento calculando el carbono equivalente (CE) que es propiedad de cada uno de los metales, a continuación se detalla su fórmula (Instituto Internacional de Soldadura).

Fórmula del Carbono Equivalente /Instituto Internacional de Soldadura. IIW

$$CE = C + \frac{(Mn+Si)}{6} + \frac{(Cr+Mo+V)}{5} + \frac{(Ni+Cu)}{15} \quad (1)$$

Calculo según fórmula:

$$CE = 0,17 + \frac{(0,98 + 0,36)}{6} + \frac{(0,5 + 0,02 + 0,038)}{5} + \frac{(0,33 + 0,36)}{15}$$

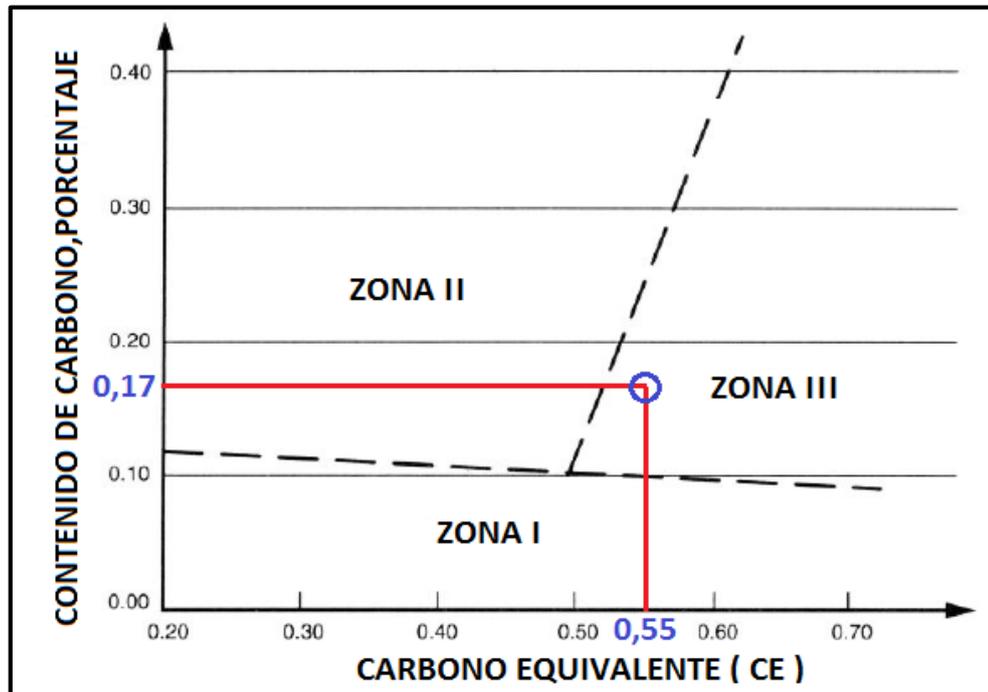
$$CE = 0,551$$

Segundo, se ubica el valor del Carbono Equivalente (CE= 0,551) y el porcentaje de carbono proporcionado por el proveedor, sobre el diagrama clasificación de zonas del acero (ver figura 10).

Las características de comportamiento de cada zona y la interpretación de las mismas es la siguiente:

Zona I. La fisuración es improbable, pero puede ocurrir con alto hidrógeno o alto nivel de restricción. Usar el método de control del hidrógeno para determinar el precalentamiento de los aceros de esa zona.

Figura 10: Código de soldadura estructural-acero AWS D1.5/ clasificación de zonas del acero



Fuente: Código de soldadura estructural- acero AWS D1.5/D1.5M:2008

Zona II. El método de control de dureza y la dureza seleccionada deberán ser utilizadas para determinar el mínimo calor aportado para soldaduras de filete de pasada única sin precalentamiento. Si el nivel de calor aportado no resulta práctico, usar el método de control de hidrógeno para determinar el precalentamiento. Para aceros con alto carbono, puede requerirse un mínimo calor aportado para el control de dureza y un precalentamiento para el control del hidrógeno tanto para soldaduras de filete como de bisel.

Zona III. Deberá usarse el método de control del hidrógeno. Donde el calor aportado deberá ser restringido para preservar las propiedades mecánicas de la ZAC (por ejemplo en algunos aceros templados y revenidos) deberá usarse el método de control del hidrógeno para determinación del precalentamiento (AWS, 2010).

Según se aprecia en la Figura 11, la línea del Carbono Equivalente (CE) de 0,55 y la línea del contenido de carbono de 0,17 se interseca dentro de la ZONA III, por lo que se utilizara el método de control de hidrogeno.

Para aplicar este método se determina el valor del Parámetro de Composición (Pcm).

$$P_{cm} = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn}{20} + \frac{Cu}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Cr}{20} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} \quad 5V \quad (2)$$

$$P_{cm} = 0,17 + \frac{0,36}{30} + \frac{0,98}{20} + \frac{0,36}{20} + \frac{0,33}{60} + \frac{0,5}{20} + \frac{0,02}{15} + \frac{0,038}{10} \quad 5(0,038)$$

El Valor de Parámetro de Composición se detalla a continuación:

$$P_{cm} = 0,28$$

El nivel de hidrógeno deberá ser determinado y definirse como sigue:

- 1) **H1 Hidrógeno Extra – Bajo.** Estos consumibles deben tener un contenido de hidrógeno difusible menor que 5ml/100g de metal depositado cuando medido de acuerdo con la norma indicada.

Los siguientes consumibles podrán ser considerados como que alcanzan estos requerimientos:

- a) Electrodo de bajo hidrógeno tomados de envases herméticamente sellados, secados entre 340 °C y 430 °C por una hora (teniendo en cuenta la indicación específica del fabricante del consumible) y usados dentro de las dos horas de ser retirados.

- b) GMAW con alambres sólidos limpios.

- 2) **H2 Bajo Hidrógeno.** Estos consumibles deben tener un contenido de hidrógeno difusible menor que 10ml/100g de metal depositado medido de acuerdo con la norma. Esto puede ser establecido ensayando cada tipo y marca o combinación alambre/fundente aplicada.

- 3) **H3 Hidrógeno no controlado.** El resto de los consumibles que no alcanzan los requerimientos de H1 o H (AWS, 2010).

La clasificación de los tipos de soldadura con distintos niveles de restricción se efectuará por la experiencia, análisis de ingeniería, investigación o cálculo. Una vez determinado el valor del parámetro de composición (CE= 0,28) y ubicado el

nivel de hidrogeno H2 Bajo Hidrógeno se ubica el índice de susceptibilidad, según la siguiente tabla.

Tabla 8. Agrupamiento del índice de susceptibilidad en función de hidrogeno difusible “H” y parámetro de composición (carbono equivalente)

Nivel de Hidrógeno H	< 0,18	< 0,23	< 0,28	< 0,33	< 0,38
H1	A	B	C	D	E
H2	B	C	D	E	F
H3	C	D	E	F	G

Fuente: Código de soldadura estructural-acero AWS D1.1/D1.1M:2010

A continuación se analiza el nivel de restricción según la manera en las que trabaja los respectivos elementos.

Se han establecido tres niveles de restricción:

- 1) Bajo. Este nivel describe juntas soldadas de filete y con biseles simples, en los cuales existe una libertad razonable de movimiento de los elementos estructurales.
- 2) Medio. Este nivel describe juntas soldadas de filete y con bisel en las cuales debido a que los elementos estructurales se encuentran fijos o parcialmente fijos existe una libertad de movimiento reducida.
- 3) Alto. Este nivel describe soldaduras en los cuales no existe casi libertad de movimiento para los elementos estructurales unidos (tales como soldaduras de reparación, especialmente con materiales de gran espesor) (AWS, 2010).

Según lo analizado escogemos como nivel de restricción Medio, ya que los elementos de la estructura del puente deben estar parcialmente fijos por lo que existe una libertad de movimiento reducida (ver tabla 9).

Se ha determinado el valor del grado de temperatura al cual será sometido el material base antes de ser soldado, para un acero **ASTM A588, Gr A = 140°**

Tabla 9. Temperaturas mínimas de precalentamiento y entre pasadas para tres niveles de restricción

Nivel de restricción	Espesor mm	A	B	C	D	E	F	G
Bajo	< 10	< 20	< 20	< 20	< 20	60	140	159
	10-20	< 20	< 20	20	60	100	140	150
	20-38	< 20	< 20	20	80	110	140	150
	38-75	20	20	40	95	120	140	150
	> 75	20	20	40	95	120	140	150
Medio	< 10	< 20	< 20	< 20	< 20	70	140	160
	10-20	< 20	< 20	20	80	115	140	160
	20-38	20	20	75	110	140	150	160
	38-75	20	80	110	130	150	150	160
	> 75	95	120	140	150	160	160	160
Medio	< 10	< 20	< 20	20	40	110	159	160
	10-20	< 20	20	65	105	140	160	160
	20-38	20	85	115	140	150	160	160
	38-75	115	130	150	150	160	160	160
	> 75	115	130	150	150	160	160	160

Fuente: Código de soldadura estructural-acero AWS D1.1/D1.1M:2010

3.2.6 *Métodos de ensayo y criterios de aceptación para la calificación de WPS.* Los especímenes de ensayo deben estar preparados de acuerdo a la norma aplicable así como también deberán prepararse para las respectivas pruebas de ensayo.

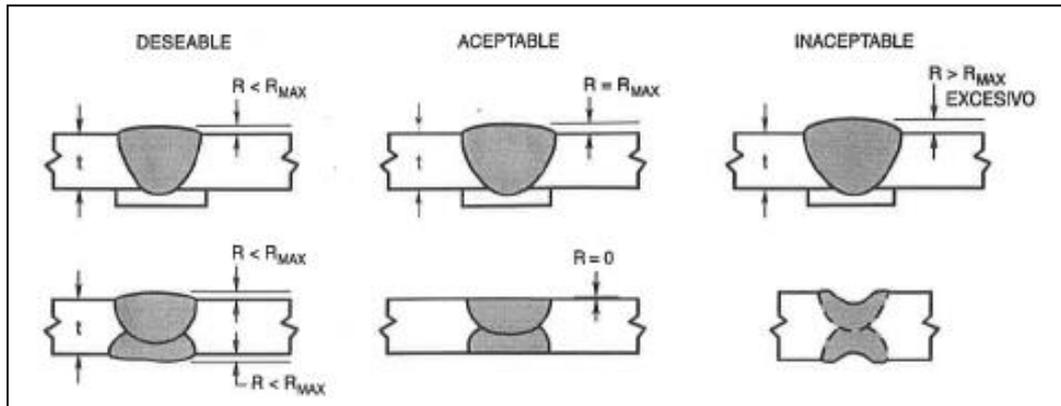
3.2.6.1 *Inspección visual de las soldaduras.* La calificación visual aceptable para la calificación de soldaduras de canal o de filete, deben estar en conformidad con los siguientes requerimientos según aplique:

Las soldaduras deben de cumplir con los siguientes requerimientos:

- 1) Cualquier grieta debe ser inaceptable, sin importar el tamaño.
- 2) Todos los cráteres deben ser llenados hasta la sección transversal completa de la soldadura.
- 3) El reforzamiento (refuerzo) de la soldadura no debe exceder 1/8 pulg. [3 mm]. El perfil de la soldadura debe estar en conformidad con la figura 12 / figura 13 y debe tener una fusión completa.
- 4) La socavación no debe exceder 1/32 pulg. [1 mm].
- 5) La raíz de soldadura para canales CJP debe ser inspeccionada, y no debe tener

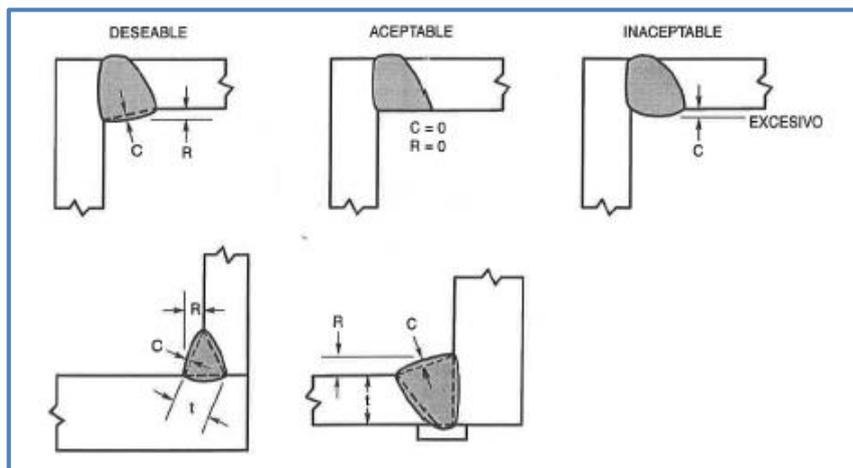
ninguna fisura, fusión incompleta o penetración inadecuada de la junta.

Figura 11: Perfiles de soldadura en junta a tope



Fuente: Código de soldadura estructural-acero AWS D1.1/D1.1M:2010

Figura 12: Perfiles de soldadura de canal juntas de esquinas interior



Fuente: Código de soldadura estructural-acero AWS D1.1/D1.1M:2010

- 6) Para canales CJP soldados de un lado sin respaldo, concavidad en la raíz o sobre fundido deben estar en conformidad con lo siguiente:
- a) La concavidad de raíz máxima debe ser de 1/16 pulg. [2 mm], siempre que el espesor total de la soldadura sea igual o mayor que el del metal base.
 - b) El sobre fundido máximo debe ser de 1/8 pulg. [3 mm], excepto para conexiones T-, Y- y K tubulares, donde el sobre fundido no está limitado. [7]

Las soldaduras de filete deben cumplir con los siguientes requerimientos:

- 1) Cualquier fisura debe ser inaceptable, sin importar el tamaño.
- 2) Todos los cráteres deben ser llenados hasta la sección transversal completa de la

soldadura.

- 3) Los tamaños de pierna de la soldadura de filete no deben ser menores a los tamaños de pierna requeridos.
- 4) La socavación del metal base no debe exceder 1/32 pulg. [1 mm] (AWS, 2010).

3.2.6.2 NDT. Antes de preparar los especímenes de ensayo mecánico, la placa de ensayo de calificación, debe ensayarse de manera no destructiva para evaluar su sanidad, como sigue:

- **UT Y RT.** La longitud total de la soldadura en las placas de ensayo, excepto las longitudes descartadas en cada extremo, deben examinarse en conformidad con la sección 6, parte E o F del Código AWS D1.1/D1.1M:2010.

3.2.6.3 Ensayos mecánicos. Los ensayos mecánicos deben ser como sigue:

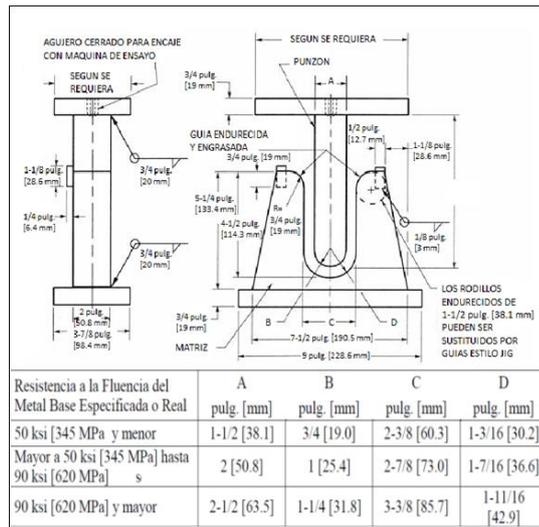
- 1) *Especímenes para doblado de raíz, cara y lado.* (ver figura 16 para doblado de raíz y de cara, y la figura 17. para doblado de lado). Cada espécimen debe doblarse en un dispositivo de doblado que cumpla con los requerimientos mostrados en las figuras 14 a la 16 o que sea sustancialmente en conformidad con esas figuras, siempre que el radio de doblado máximo exceda, cualquier medio conveniente puede utilizarse para mover el miembro punzón con relación al miembro de matriz.

El espécimen debe ser colocado en el miembro de matriz del dispositivo con la soldadura al centro. Los especímenes de doblado de cara deben colocarse con la cara de la soldadura dirigida hacia la abertura. Los especímenes de doblado de raíz y de sanidad de soldadura de filete deben colocarse con la raíz de la soldadura dirigida hacia la abertura. Los especímenes de doblado de lado deben colocarse con el lado que muestre la mayor discontinuidad, si es que lo hubiera, dirigida hacia la abertura (AWS, 2010).

El punzón debe forzar al espécimen dentro de la matriz hasta que este tome forma de U, la soldadura y las HAZ deben estar centradas y completamente dentro de la porción doblada del espécimen después del ensayo.

Cundo se utiliza el dispositivo de plantilla envolvente, el espécimen debe estar firmemente sujetado a un extremo para que no se resbale durante la operación de doblado. La soldadura y las HAZ deben estar completamente en la porción doblada del espécimen después del ensayo. Los especímenes de ensayo deben retirarse del dispositivo cuando el rodillo externo haya sido movido 180° del punto de partida.

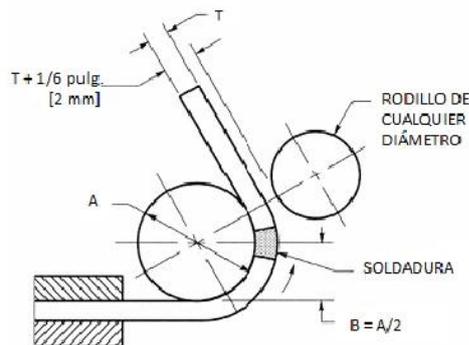
Figura 13: Ensayo de doblado guiado con matriz



Fuente: Código de soldadura estructural- acero AWS D1.5/D1.5M:2008

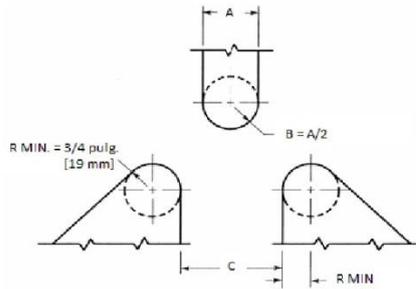
Figura 14. Ensayo alternativo de doblado envolvente guiado con matriz

Minimum Specified Base Metal Yield Strength, MPa [ksi]	A mm [in]	B mm [in]
345 [50] and under	38.1 [1-1/2]	19.0 [3/4]
Over 345 [50] to 620 [90]	50.8 [2]	25.4 [1]
620 [90] and over	63.5 [2-1/2]	31.8 [1-1/4]



Fuente: Código de soldadura estructural- acero AWS D1.5/D1.5M:2008

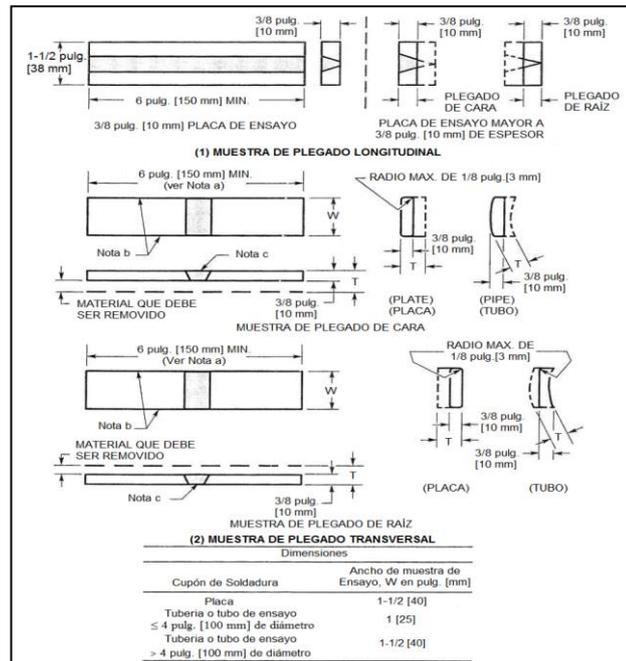
Figura 15. Ensayo alternativo de doblado guiado con rodillos con matriz con expulsión de descarga por parte inferior.



Fuente: código de soldadura estructural- acero AWS D1.5/D1.5M:2008

- 2) **Especímenes de doblado longitudinal.** Cuando las combinaciones de materiales difieren marcadamente en las propiedades de doblado mecánico, como entre dos materiales base o entre metal de soldadura y el metal base, los ensayos de doblado longitudinal (cara y raíz) pueden usarse en lugar de los ensayos de doblado transversal de cara y de raíz.

Figura 16. Muestras de doblado de cara y raíz

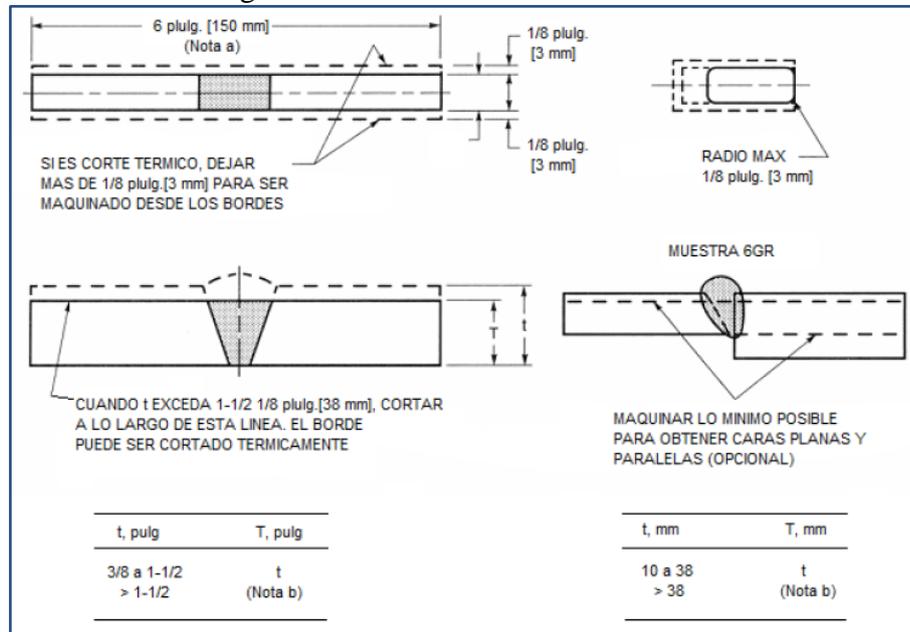


Fuente: código de soldadura estructural- acero AWS D1.5/D1.5M:2008

Los cupones de ensayo soldados en conformidad con 3.2.6.2 deben tener los especímenes de ensayo preparado mediante el corte de la placa de ensayo. Los

especímenes de ensayo para el ensayo de doblado longitudinal deben ser preparados como se muestra en la figura 16 (AWS, 2010).

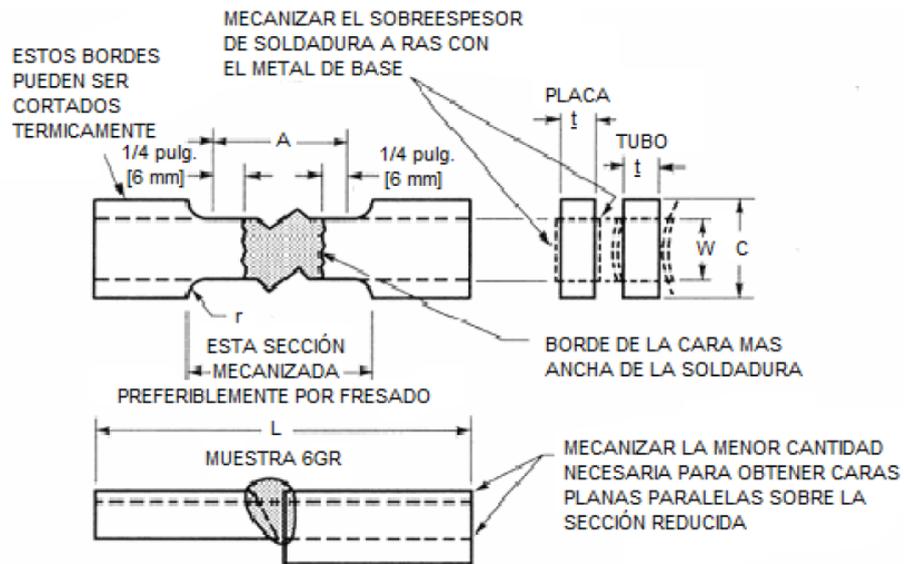
Figura 17. Muestras de doblado de lado



Fuente: código de soldadura estructural- acero AWS D1.5/D1.5M:2008

- 3) *Criterios de aceptación para ensayos de doblado.* La superficie convexa del espécimen de ensayo de doblado debe ser examinado visualmente para discontinuidades en la superficie. Para su aceptación, la superficie no debe tener discontinuidades que excedan las siguientes dimensiones:
- 1/8 pulg. [3 mm] medida en cualquier dirección de la superficie.
 - 3/8 pulg. [10 mm] la suma de las dimensiones más grandes de todas las discontinuidades que excedan 1/32 pulg. [1 mm] pero menores o iguales a 1/8 pulg. [3 mm].
 - 1/4 pulg. [6 mm] la máxima fisura de esquina, excepto cuando esa fisura de esquina resulte de una inclusión de escoria visible u otra discontinuidad de tipo fusión, entonces debe aplicarse un máximo de 1/8 pulg [3 mm]. Los especímenes con fisura de esquina que exceden 1/4 pulg. [6 mm] sin evidencia de inclusiones de escoria u otra discontinuidad de tipo fusión deben ser descartados, y se debe ensayar un espécimen de reemplazo de la soldadura original (AWS, 2010).
- 4) *Especímenes de tracción de sección reducida.* Antes del ensayo, deben medirse en ancho menor y el espesor correspondiente de la sección reducida.

Figura 18. Muestras de tracción de la sección reducida.



Dimensiones en pulgadas [mm]					
	Espesor de la Placa de Ensayo, T_p			Tubo de Ensayo	
	$T_p < 1$ pulg. [25 mm]	1 pulg. [25 mm] < $T_p < 1-1/2$ pulg. [38 mm]	$T_p > 1-1/2$ pulg [38 mm]	2 pulg. [50 mm] & 3 pulg. [75 mm] Diámetro	6 pulg. [150 mm] & 8 pulg. [200 mm] Diámetro o el Mayor Tamaño del Tubo
A—Longitud de la sección reducida	Cara más ancha de la soldadura + 1/2 pulg. [12 mm], 2-1/4 pulg. [60 mm] mín.			Cara más ancha de la soldadura + 1/2 pulg. [12 mm], 2-1/4 pulg. [60 mm] mín.	
L—Longitud total, mín. ^a	Según lo requerido por el equipo de ensayo			Según lo requerido por el equipo de ensayo	
W—Ancho de la sección reducida ^{b,c}	3/4 pulg. [20 mm] mín.	3/4 pulg. [20 mm] mín.	3/4 pulg. [20 mm] mín.	$1/2 \pm 0.01$ (12 ± 0.025)	3/4 pulg. [20 mm] mín.
C—Ancho de la sección de agarre ^{c,d}	$W + 1/2$ pulg. [12 mm] mín.	$W + 1/2$ pulg. [12 mm] mín.	$W + 1/2$ pulg. [12 mm] mín.	$W + 1/2$ pulg. [12 mm] mín.	$W + 1/2$ pulg. [12 mm] mín.
t—Espesor de la muestra ^{e,f}	T_p	T_p	T_p/n (Nota f)	El máximo posible con caras planas y paralelas dentro del largo A	
r—Radio de filete, mín.	1/2 pulg. [12 mm]	1/2 pulg. [12 mm]	1/2 pulg. [12 mm]	1 pulg. [25 mm] 1 pulg. [25 mm]	

Fuente: Código de soldadura estructural-acero AWS D1.1/D1.1M:2010

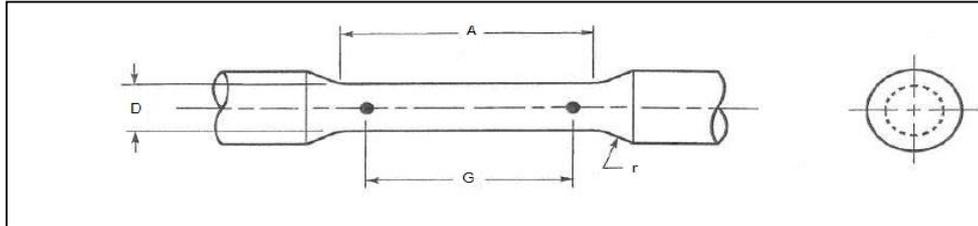
El espécimen debe romperse bajo la carga de tracción, y debe determinarse la carga máxima. El área transversal debe obtenerse multiplicando el ancho por el espesor. La resistencia a la tracción debe obtenerse dividiendo la carga máxima por el área transversal (ver figura 19).

5) *Criterios de aceptación para ensayo de tracción de sección reducida.* La resistencia a la tracción no debe ser menor que el valor mínimo del rango de

tracción especificado del metal base utilizado.

- 6) *Especímenes de tracción de metal de soldadura.* El espécimen de ensayo debe ensayarse en conformidad con ASTM A 370, Mechanical Testing of Steel Products ver figura 19

Figura 19. Muestras de doblado de cara y raíz



Dimensiones en pulgadas			
	Muestra Estándar	Muestras de Menor Tamaño Proporcionales a Estándar	
Diámetro Nominal	0.500 pulg. de Diámetro	0.350 pulg. de Diámetro	0.250 pulg. de Diámetro
G—Longitud Calibrada	2.000 ± 0.005	1.400 ± 0.005	1.000 ± 0.005
D—Diámetro (Nota a)	0.500 ± 0.010	0.350 ± 0.007	0.250 ± 0.005
r—Radio de filete, min.	03-ago	01-abr	mar-16
A—Longitud de sección reducida (Nota b), min.	02/01/2004	01/03/2004	01/01/2004
Dimensiones (versión métrica por ASTM E 8M)			
	Muestra Estándar	Muestras de Menor Tamaño Proporcionales a Estándar	
Diámetro Nominal	12.5 mm de Diámetro	9 mm de Diámetro	6 mm de Diámetro
G—Longitud Calibrada	62.5 ± 0.1	45.0 ± 0.1	30.0 ± 0.1
D—Diámetro (Nota a), mm	12.5 ± 0.2	9.0 ± 0.1	6.0 ± 0.1
r—Radio de filete, mm, min.	10	8	6
A—Longitud de sección reducida, mm (Nota b), min.	75	54	36

Fuente: Código de soldadura estructural-acero AWS D1.1/D1.1M:2010

- a) La sección reducida puede tener una forma cónica gradual desde el extremo hasta el centro, con los extremos no mayores a 1% mayor en diámetro que el centro (dimensión controladora).

Si se desea, la longitud de la sección reducida puede ser incrementada para acomodar un extensómetro de cualquier calibre. Las marcas de referencia para la medida de alargamiento deben ser apartadas proporcionalmente con la longitud del calibre.

Nota: La longitud del calibre y del filete deben ser mostrados de la forma demostrada, pero los extremos pueden ser de cualquier forma para que puedan

encajar con la máquina de ensayo para que la carga sea axial. Si los extremos son los puntos de agarre, es deseable, si es posible hacer que la longitud de la zona de agarre sea más grande por 2/3 más que grande que los agarres para hacer que la muestra se extienda a los puntos de agarre (AWS, 2010).

3.2.6.4 *Ensayo de macro-ataque.* Las probetas de soldadura deben prepararse con un acabado adecuado para el examen de macro-ataque. Debe utilizarse una solución adecuada para que el ataque de una clara definición de la soldadura.

1) *Criterios de aceptación para ensayo de macro-ataque.* Para una calificación aceptable la probeta de ensayo, cuando se inspecciona visualmente, debe cumplir con los siguientes requerimientos:

- Soldaduras de canal PJ; el tamaño real de la soldadura debe ser igual o mayor al tamaño de soldadura especificado.
- Las soldaduras de filete deben tener fusión a la raíz de la junta, pero no necesariamente más allá.
- El tamaño mínimo de la pierna debe cumplir con el tamaño de soldadura de filete especificado (AWS, 2010).

3.2.6.5 *Repetición del ensayo.* Si algún espécimen de todas las ensayadas fallas en cumplir con los requerimientos de ensayo pueden realizarse dos repeticiones de ensayo para ese tipo particular de espécimen, con especímenes cortados del mismo material de calificación WPS. Los resultados de ambos especímenes de ensayo deben cumplir con los requerimientos de ensayo. Para materiales de más de 1-1/2 pulg. [38 mm] de espesor, la falla de un espécimen debe requerir en ensayo de todos los especímenes del mismo tipo de dos ubicaciones adicionales en el material de ensayo.

3.2.7 *Soldaduras de canal CJP para conexiones no tubulares.* Ver la tabla 10 para los requerimientos para calificar un WPS de una soldadura CJP en conexiones no tubulares (ver la siguiente tabla).

Tabla 10. Designación de ensayo mecánico y cantidad de probetas

Espesor nominal de chapa para ensayo, mm	Cantidad de probetas				Espesor nominal calificado en chapa	
	Tracción con la probeta de sección reducida	Doblado de raíz	Doblado de cara	Doblado lateral	Mín. (Pulg.)	Máx. (Pulg.)
$3 \leq T \leq 10$	2	2	2	-	1/8	2T
$10 \leq T \leq 25$	2	-	-	4	1/8	2T
25 y mayor	-	1	1	1	1/8	ilimitado

Fuente: Código de soldadura estructural-acero AWS D1.1/D1.1M:2010

- 1) *Juntas de esquina o juntas T.* Las probetas para soldadura de canal en juntas de esquina o en juntas T deben ser juntas a tope que tengan la misma configuración de canal que la junta de esquina o en T a ser usada en construcción, excepto que la profundidad del canal no necesite ser mayor a 1 pulg. [25 mm].

3.2.8 Soldaduras de filete para conexiones tubulares y no tubulares son:

- 1) *Tipo y número de probetas.* A excepción de lo permitido en otra parte de este capítulo, el tipo y número de probetas que deben ser ensayadas para calificar un WPS de soldadura de filete de un solo pase y/o soldadura de filete de múltiples pases se muestran en la tabla 8. Los ensayos para calificar pueden ser para soldaduras de filete de un solo pase o para soldaduras de filete de múltiples pases o ambas (ver tabla 11) (AWS, 2010).
- 2) *Ensayo de soldadura de filete.* Una junta en T soldada a filete, como se muestra en el anexo B para placas, debe hacerse para cada WPS y posición que se utilizará en la construcción, se requieren que se hagan ensayos para la soldadura de filete un solo pase de tamaño máximo y para la soldadura de filete de múltiples pases de tamaño mínimo usadas en la construcción. Estos dos ensayos de soldadura de filete pueden combinarse en un solo ensamble soldado o montaje de ensayo o calificadas de forma individual como calificaciones por separado.

Tabla 11. Muestras de ensayo requeridas

Muestras de ensayo requeridas						Tamaños calificados	
Muestra de Ensayo	Tamaño de Filete	Cantidad de Soldaduras para EPS	Macroataque	Tracción en el Metal de Soldadura (ver Figura 20)	Doblado Lateral (ver Figure 18)	Espesor ³ de Placa/Tubo	Tamaño de filete
Ensayo -T de Placa (Anexo 2)	Pasada única, tamaño max. a ser usado en construcción	1 en cada posición a ser usada	3 caras			Ilimitado	Max. pase individual ensayado y menor
	Pasada múltiple, tamaño min. a ser usado en construcción	1 en cada posición a ser usada	3 caras			Ilimitado	Min. pase múltiple ensayado y mayor
Ensayo -Canal	Pasada única, tamaño max. a ser usado en construcción	1 en cada posición a ser usada (ver tabla 2)	3 caras (excepto para 4F y 5F, se requieren 4 caras)			Ilimitado	Max. pase individual ensayado y menor
	Pasada múltiple, tamaño min. a ser usado en construcción	1 en cada posición a ser usada (ver tabla 2)	3 caras (excepto para 4F y 5F, se requieren 4 caras)			Ilimitado	Min. pase múltiple ensayado y mayor
Ensayo -T de tubo (Anexo 3)		1 en posición 1G		1	2	Califica para los consumibles de soldadura a ser usados en el ensayo T	

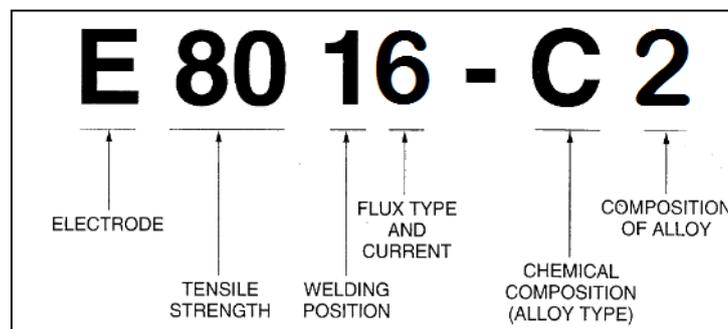
Fuente: Código de soldadura estructural-acero AWS D1.1/D1.1M:2010

- 3) *Ensayo de verificación de consumibles.* Si el consumible propuesto por el contratista no cumple con el código AWS D1.1/D1.1M:2010, entonces una placa de ensayo de soldadura de canal CJP debe soldarse para calificar el procedimiento.
- 4) *Tipo de Electro sugerido.* El tipo de electrodo sugerido por el diseñador según Anexo E es el E8016-C2, cuyo electrodo se emplea para proceso SMAW, es también un electrodo de baja aleación, bajo hidrógeno, electrodo de hierro en polvo diseñado para la soldadura de acero al níquel donde las propiedades de impacto a baja temperatura deben ser buenas. Ver figura 20
 - a) *Aplicaciones.* El tipo de electrodo E8016-C2 está diseñado para soldadura de 3,5% de Ni de acero se trabaja con acero ASTM A203, utilizado para recipientes a presión, tanques de almacenamiento (AWS, 2006).

b) *Características de uso.* El electrodo E8016.C2 es de bajo contenido de hidrógeno, buena tenacidad de soldadura a baja temperatura, además se pueden soldar en cualquier posición (ver figura 20)

Los electrodos se deben secar a 350 ~ 400 °C (662 ~ 752 °F) durante 60 minutos antes de su uso precalentar a 100 ~ 150 °C (212 ~ 302 °F) temperatura de precalentamiento varía de acuerdo con la placa espesor y tipo de acero por lo que se debe mantener el arco lo más corto posible (AWS, 2006).

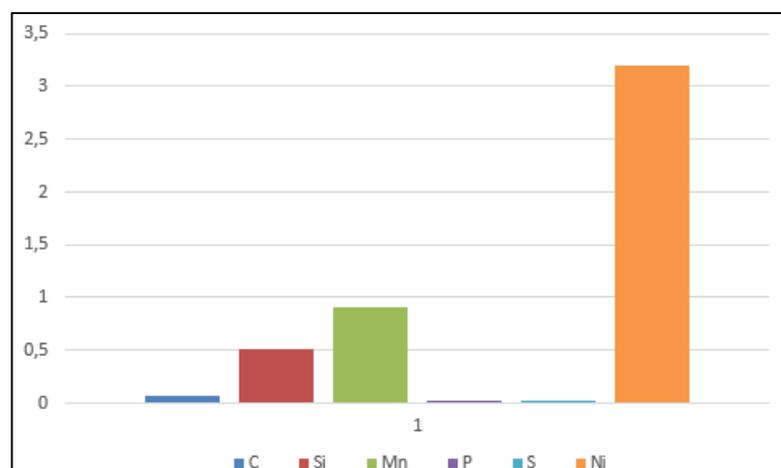
Figura 20. Designación de electrodo SMAW



Fuente: Código de soldadura estructural-acero AWS D1.5/D1.5M:2008

c) *Composición química y mecánica del electrodo E8016-C2.* Según el código AWS D5.5:2008 este tipo de electrodo se compone química y mecánicamente según las figura 21 y tabla 12.

Figura 21. Composición química del electrodo E8016-C2



Fuente: Código AWS D5.5:2008

Tabla 12. Propiedades mecánicas típicas del electrodo E8016-C2

Sy		Ts		Elongación
N/mm ²	Lbs/in ²	N/mm ²	Lbs/in ²	(%)
530	77000	630	91000	30

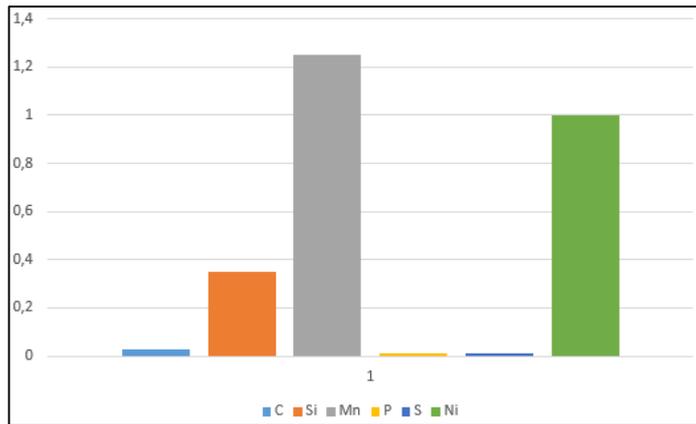
Fuente: Código AWS D5.5:2008

d) *Selección del tipo de electrodo más apropiado.* Si bien es cierto el diseñador nos sugiere un tipo de electrodo el cual es el E8016-C2 para proceso SMAW, he realizado un estudio minucioso de cada uno de ellos con el ánimo de encontrar un reemplazo al tipo de electrodo ya que el mismo diseñador deja abierta la posibilidad de poder cambiarlo, siempre y cuando se mantenga o se mejore el límite de fluencia. Todo esto obedeciendo a criterios de Plazos, economía, logística de insumos entre otros (ver anexo E).

Revisando los elementos químicos y sus propiedades mecánicas se ha logrado determinar según tablas un alambre tubular específicamente para proceso FCAW y con similares características a la del electrodo E8016-C2, en páginas anteriores (2.1.2.1.) había hablado del diámetro máximo del alambre E81T1-Ni1-H4 donde se indica que iban desde 1,2 mm a 4,0 mm (0,045 a 5/32) y su designación según AWS 5.29 (ver anexo D.)

e) *Composición Química y Mecánica del Alambre Tubular E81T1-Ni1-H4* Según el código AWS A5.29/A5.29M:2010 se compone química y mecánicamente según las figura 22 y tabla 13.

Figura 22. Composición química del electrodo E81T1-Ni1-H4



Fuente: código AWS A5.29/A5.29M:2010

Tabla 13. Propiedades mecánicas típicas del electrodo E81T1-Ni1

Sy		Ts		Elongación
N/mm ²	Lbs/in ²	N/mm ²	Lbs/in ²	(%)
570	82700	640	92900	25

Fuente: Código AWS A5.29/A5.29M:2010

Al comparar las figuras 21 y 22 claramente se observa que los cambios significativos los se encuentran en los elementos:

- Manganeso (Mn) para obtener gran resistencia a tracción y resistencia al agrietamiento a temperatura ambiente.
- Níquel (Ni) para mayor dureza en el material de aporte.

Además, al comparar la tabla 13 y 14 nos proporciona una mayor claridad para poder elegir el tipo de electrodo ya que nos presenta una mayor resistencia a la fluencia, es decir se prefirió el alambre tubular E81T1-Ni1.

3.2.9 Juntas a tope. Si los consumibles de soldadura utilizados no están en conformidad con las disposiciones precalificadas de la sección 3 del código AWS D1.1/D1.1M:2010.

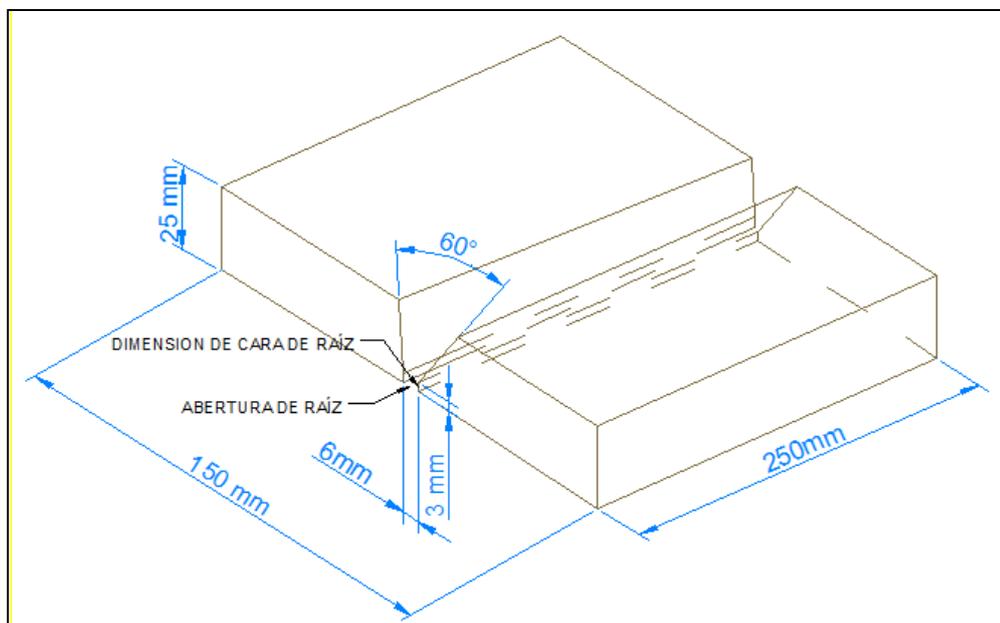
Si el WPS que utiliza el consumible propuesto no ha sido establecido por el Contratista

en conformidad con 3.2.7 o 3.2.8, entonces una placa de ensayo de soldadura de canal CJP debe soldarse para calificar la combinación propuesta (AWS, 2010).

La placa de ensayo debe soldarse como se indica en la figura 23.

3.2.10 *Desarrollo de WPS.* Se emplea todos los criterios antes mencionados y se resumen en un documento que posteriormente servirá como base para la calificación del desempeño del soldador (WPQ). Ver Anexo D

Figura 23. Placa de ensayo para espesor ilimitado-calificación del soldador



Fuente: Código de soldadura estructural-acero AWS D1.1/D1.1M:2010

CAPÍTULO IV

4. CALIFICACIÓN DEL DESEMPEÑO DEL SOLDADOR (WPQ)

4.1 Calificación del desempeño

Los ensayos de calificación del desempeño requeridos por este código son ensayos concebidos específicamente para determinar la habilidad de un soldador, para producir soldaduras sanas. Los ensayos de calificación no pretenden usarse como guías para soldar durante la construcción real, se debe realizar en conformidad con un WPS (AWS, 2010).

4.1.1 Posiciones de soldadura de producción calificadas. Las posiciones de soldadura de producción calificadas para soldadores y operadores de soldadura deben estar en conformidad con la siguiente tabla.

Tabla 14. Posiciones de soldadura de producción calificadas

Ensayo de calificación		Soldadura de chapa calificada para producción			
	Tipo de soldadura	Posiciones	Bisel CJP	Bisel PJP	Filete
PLACA	Bisel	1G	F	F	F,H
		2G	F,H	F,H	F,H
		3G	F,H,V	F,H,V	F,H,V
		4G	F,OH	F,OH	F,OH
		3G + 4G	Todas	Todas	Todas
	Filete	1F			F
		2F			F,H
		3F			F,H,V
		4F			F,H,OH
		3F + 4F			Todas

Fuente: Código de soldadura estructural-acero AWS D1.1/D1.1M:2010

Siguiendo el WPS, para la calificación del desempeño del soldador se califica en posición 4G y sin placa de respaldo, según Tabla 15 está implícito la posición de bisel tanto plana y sobrecabeza. Ver figura 25

Figura 24. Placa de ensayo para espesor ilimitado-calificación para posición 4G / soldadura en campo



Fuente: Autor

4.1.2 *Espesores de producción calificados.* El rango de espesores calificados de soldadura de producción para los cuales un soldador está calificado debe estar en conformidad con la Tabla 15.

Tabla 15. Espesores de producción calificados

Ensayo en Chapa		Números de Probetas			
Soldaduras con Canal o en Tapón (Tapón) para la Producción		Doblado de Cara (Fig. 25 y 26)	Doblado de Raíz (Fig. 25 y 26)	Doblado Lateral (Fig. 25 y 26)	Tracción
Tipo de Ensayo de Soldadura (Figuras Aplicables)	Espesor Nominal de Chapa de Ensayo, mm. T,				
Canal (1G o 2G)	10	1	1	(Nota a)	-
Canal (Tubo 1F o 2F - o 1G)	$10 < T < 25$	-	-	2	-
Canal (Tubo 1F o 2F - o 4G)	25 o más	1	1	1	-

Fuente: Calificación de soldador y operador-número y tipo de especímenes de ensayo y rango de espesor y diámetro calificado. /código AWS A5.29/A5.29M:2010

Nota: Para espesores de 3/8 pulg. un doblado lateral puede reemplazar al doblado de cara y otro para el de raíz.

4.1.3 *Calificación del soldador y operador de soldadura a través de calificación WPS.* Un soldador también puede ser calificado soldando una placa, tubo o tubería de ensayo de calificación satisfactorio que cumpla con los requerimientos del WPS (AWS, 2010).

4.1.4 *Tipos de ensayo de calificaciones requeridas son:*

El tipo y número de ensayos de calificación requeridos para los soldadores deben estar en conformidad con la tabla 16. Los detalles de los requerimientos para los NDT individuales y los ensayos mecánicos, se encuentran en las siguientes subsecciones (AWS, 2010).

- Inspección visual (ver 4.1.10) (use los requerimientos WPS).
- Ensayo de doblado de cara, raíz y lado (4.1.10)

4.1.5 *Pre calentamiento del metal base y su ejecución.* El pre-calentamiento puede ser definido como la aplicación de calor a un metal base, antes de la respectiva soldadura. Los sopletes de gas, calentadores eléctricos, o calentadores de paneles radiantes infrarrojos pueden ser utilizados para realizar el pre-calentamiento, lo cual reduce la velocidad de enfriamiento de soldadura y por tanto evita el agrietamiento en frío de las soldaduras.

Disminuir los índices de enfriamiento previene la formación de estructuras quebradizas de soldadura, y retira el hidrógeno difusible, lo cual a su vez impide la aparición de grietas en frío en las soldaduras. En el ítem 2.5.2 se detalla el procedimiento para determinar la temperatura de precalentamiento e interpase (ver figura 25).

4.1.6 *Características eléctricas del fabricante.* Cuando se escoge el tipo de alambre tubular es importante revisar el catalogo del fabricante porque en base a la experiencia; polaridad, corriente, voltaje, entre otros factores. Sugiere ciertos valores que han sido

comprobados y por ende ayuda a la elaboración del WPS. Ver figura 26 y Tabla 16.

Figura 25. Pre calentamiento de placa de ensayo entre 140°C – 250°C en campo



Fuente: Autor

4.1.7 *Características eléctricas de soldeo.* Cuando se escoge el tipo de alambre tubular es importante revisar el catalogo del fabricante porque en base a la experiencia; polaridad, corriente, voltaje, entre otros factores. Sugiere ciertos valores que han sido comprobados y por ende ayuda a la elaboración del WPS. Ver figura 26 y Tabla 16.

Figura 26. Aplicación de la polaridad, voltaje y amperaje tomados en campo



Fuente: Autor

Tabla 16. Características eléctricas de soldeo

Parámetros de soldeo recomendados		
Diámetro (mm)	1,2	1,6
Polaridad	Corriente continua electrodo al positivo [DCEP]	
Amperaje (A)	140 - 320	200 - 380
Voltaje (V) constante	22 - 35	25 - 36
Flujo de Gas	15 – 25 L/Min	
Rendimiento	0.6	

Fuente: Tabla de parámetros de soldeo recomendados por el proveedor Lincoln.

4.1.8 Diseños de juntas según WPS. Previamente en el procedimiento de soldadura WPS se detalla el tipo de junta que se empleara, es decir la del tipo en V simple. En la figura 27 se observa la preparación de dicha junta por parte del soldador a ser calificado, hay que recordar que el bisel a 60° se lo corta térmicamente y se lo mecaniza con disco de pulir y amoladora.

Figura 27. Corte y mecanizado de placa para calificación en campo



Fuente: Autor

4.1.9. Tipo de gas protector. En 4.1.6 se dice que es importante las especificaciones técnicas del fabricante específicamente el alambre tubular y la máquina de soldadura, donde nos indican que flujo de CO2 es el más recomendado. Ver tabla 17

4.1.10 Inspección Visual. Ver 3.2.6.1 para criterios de aceptación.

1) **Criterios de aceptación visual del Apuntalado.** El apuntalado debe presentar una apariencia razonablemente uniforme y debe estar libre de traslape, fisuras y

socavado que exceda 1/32 plg. [1 mm]. No debe haber porosidad visible en la superficie del apuntalado (AWS, 2010).

Tabla 17. Tipo de gas protector

Condiciones de soldadura óptimas para alambres tubulares – FCAW
PLACAS DE ACERO: Gas de protección CO ₂ para proceso FCAW, el flujo de gas recomendado es de 15L/min


Fuente: Tabla de parámetros de flujo recomendados por el proveedor Lincoln.

- 2) *Ejecución de la soldadura y determinación del número de pases.* Una vez preparada la junta se procede a realizar la soldadura de misma según se detalla en la figura 28 y también el número de pases realizados. Ver tabla 18.

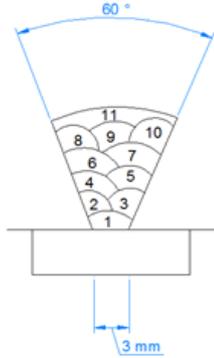
Figura 28. Calificación de soldadores en posición 4G.(Izq.)/ probeta soldada (Der.)



Fuente: Autor

Tabla 18. Ejecución de la soldadura y determinación del número de pases.

PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA							
Pase o capa de soldadura	Proceso	METALES DE APORTE		CORRIENTE		Voltios	Velocidad de Recorrido
		Clase	Diámetro	Tipo de polaridad	Amperios o velocidad de Alimentación alambre		
11	FCAW	E81T1-Ni1	1.2 mm	DCEP	180 - 250 A	25 - 26 V	8 - 12 Plg/min

Detalles de Junta


Fuente: Tabla de parámetros prácticos en el proceso de calificación de soldadores.

- 3) *Probetas de doblado de raíz, cara y doblado.* La cantidad de especímenes a obtenerse a partir de la probeta soldada se detalló en Tabla 16, donde se indica 2 especímenes para doblado lateral y 1 para ensayo de tracción. Ver Anexo C
- 4) *Doblado de Probetas.* Las dos probetas aprobaron el ensayo de doblado lateral.

Figura 29. Ensayo de doblado lateral en espécimen de espesor 1 pulg. [25 mm]



Fuente: Autor

4.1.11 Registro del WPQ. El WPQ es un documento donde se registra y se aprueba la aplicación del WPS por parte del soldador para que posteriormente le faculte la aplicación de dicha soldadura en campo. Los soldadores de manera individual están certificados con un test de cualificación, documentado que demuestra que tienen los conocimientos y una capacidad demostrada para trabajar dentro de los WPS especificados. Ver Anexo G.

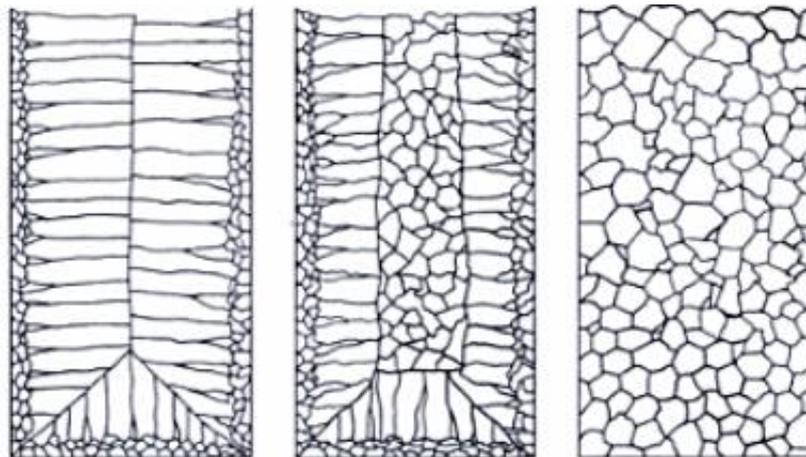
CAPÍTULO V

5. ANÁLISIS DE LA MICROESTRUCTURA.

5.1 Solidificación de la soldadura

Después de aplicar calor e introducir el metal de aporte (si es el caso) en la zona de soldadura. Se deja enfriar la unión de soldadura fundida hasta la temperatura ambiente (SEROPE, 1999). El proceso de solidificación se parece al de la fundición, y comienza con la formación de granos columnares. Ver figura 30

Figura 30. Desarrollo de granos columnares



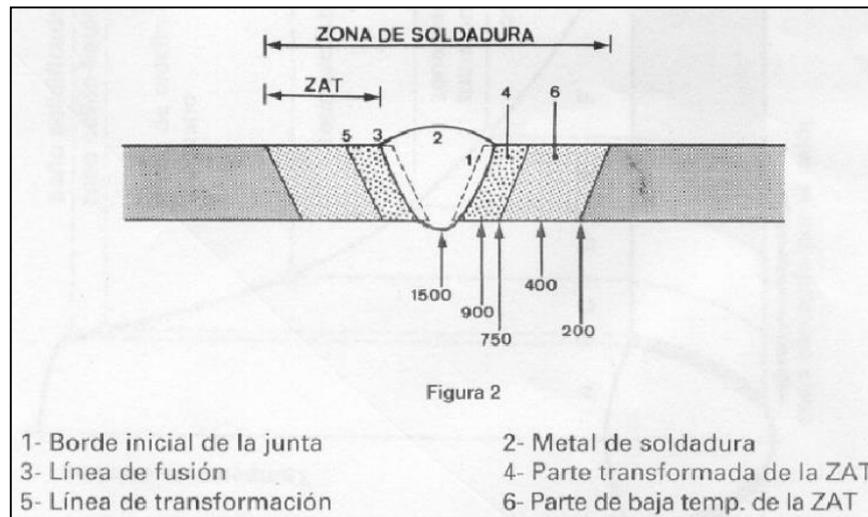
Fuente: Autor

Estos granos son relativamente largos y se forman paralelos al flujo de calor. Como los metales son buenos conductores de calor que el aire que los rodea, los granos son paralelos al plano de los dos componentes que se sueldan se muestran granos en una soldadura superficial (SEROPE, 1999). Ver figura 31

La estructura y tamaño de los granos dependen de la aleación específica, del proceso específico de soldadura empleado y del metal específico de aporte. Comparado con los cordones de soldadura producidos con los métodos tradicionales, el tamaño de cordón realizado con el proceso de haz de electrones o de rayo láser es mucho más angosto

(SEROPE, 1999).

Figura 31. Desarrollo de granos columnares y zona afectada térmicamente ZAT / código de soldadura estructural-acero AWS D1.1/D1.1M:2010



Fuente: Autor

La estructura y tamaño de los granos dependen de la aleación específica, del proceso específico de soldadura empleado y del metal específico de aporte. Comparado con los cordones de soldadura producidos con los métodos tradicionales, el tamaño de cordón realizado con el proceso de haz de electrones o de rayo láser es mucho más angosto (SEROPE, 1999).

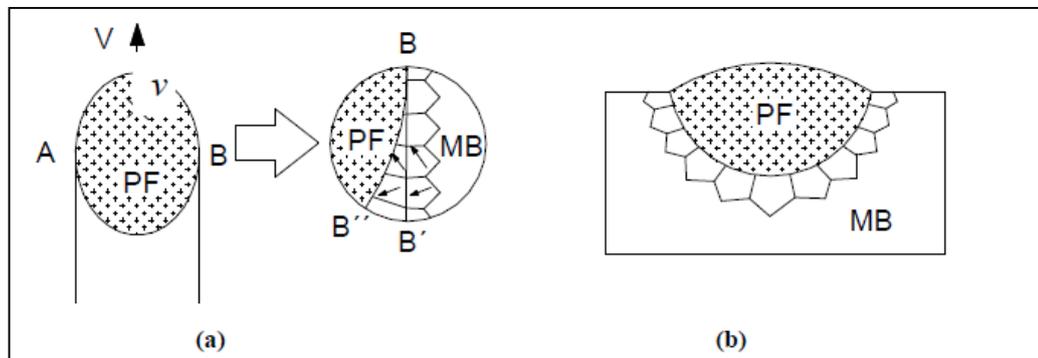
El metal de soldadura tiene, fundamentalmente una estructura de fundición y, como se ha enfriado con lentitud, tiene granos bastos. En consecuencia, en general esta estructura tiene baja resistencia, tenacidad y ductilidad. Sin embargo, la soldadura mejora las propiedades mecánicas de la unión.

Los resultados dependen de la aleación en particular, su composición y los ciclos térmicos a los que se somete la unión. Por ejemplo, las velocidades de enfriamiento se pueden controlar y reducir si se precalienta por lo general la zona de soldadura antes de ser soldada (SEROPE, 1999).

5.1.1 *Solidificación inicial del pozo de soldadura.* La solidificación del metal de soldadura se procede espontáneamente, se inicia en los puntos de máximo espesor del pozo de fusión (puntos A y B). Los granos en la zona de fusión se forman como un

prolongamiento de los granos parcialmente fundidos del metal base. Ver figura 32.

Figura 32. Inicio de solidificación

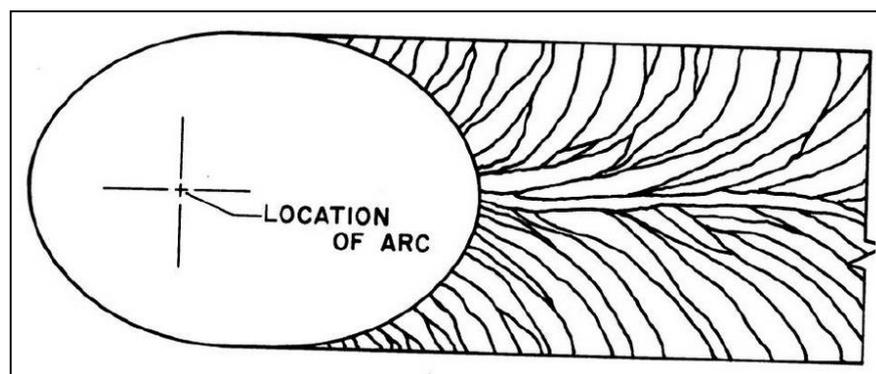


(a) vista superior, (b) corte transversal en AB. PF (poso de fusión), MB (metal base), v (velocidad de soldadura), BB' (línea de fusión), BB (frente de solidificación). Las flechas en (a) indican esquemáticamente las orientaciones cristalinarias.

Fuente: Metalografía para estudiantes 2012

5.1.2 Crecimiento competitivo. El crecimiento de los granos columnares en un cordón de soldadura con piqueta de geometría elíptica. Obsérvese el curvado de los granos para mantener una dirección de crecimiento lo más alineada posible con el gradiente de temperatura cuya orientación va cambiando a medida que la piqueta avanza, lo que da origen a un crecimiento competitivo. Ver figura 33.

Figura 33. Crecimiento competitivo de los granos columnares



Fuente: Metalografía para estudiantes 2012

5.1.3 Microestructura. La fuente de calor aplicada produce gradientes de temperatura en las placas. Este gradiente se representa por las líneas en colores alrededor de la zona donde se aplica el calor.

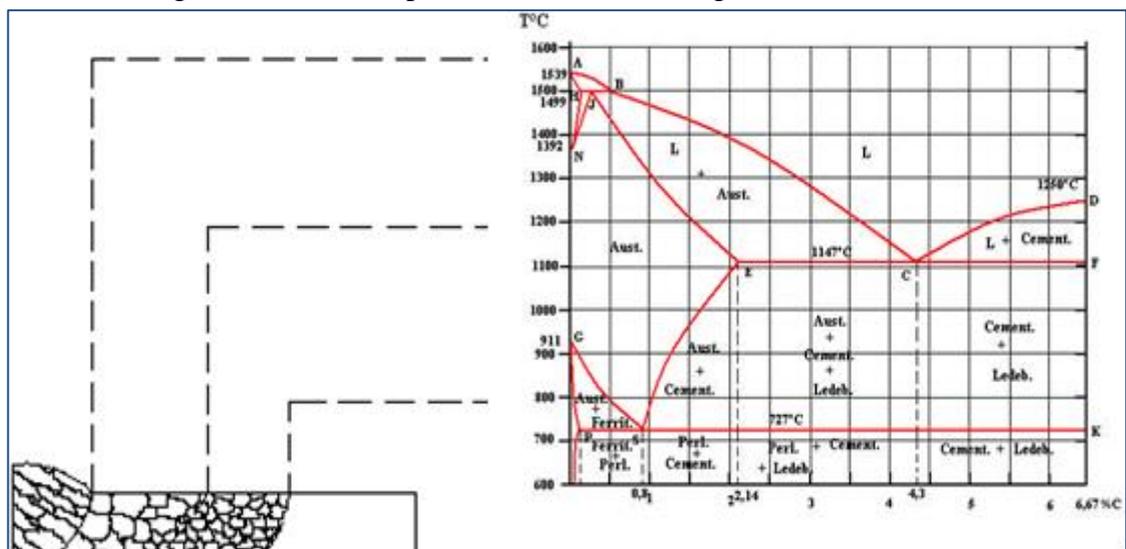
En la zona de la unión, el metal alcanza una temperatura elevada y en las zonas lejanas a la unión, el metal prácticamente no sufre cambio alguno de temperatura. Este calentamiento no uniforme puede generar problemas de esfuerzos residuales en la zona cercana al cordón de soldadura, lo cual podría afectar la resistencia estructural de la unión, sin embargo; el efecto más severo de la zona afectada por el calor es el cambio en la microestructura, y por consiguiente en las propiedades del metal, en la figura 33 se muestra un esquema de la microestructura que se formaría en la zona afectada por el calor cuando se suelda una placa de acero.

Básicamente pueden identificarse tres zonas distintas en la zona afectada por el calor:

La primera zona consiste en el pozo de metal líquido que se forma cuando se aplica calor a las piezas. Este pozo solidifica formando granos alargados que siguen la dirección del gradiente térmico en la pieza.

La segunda es una zona intermedia que siempre permanece en estado sólido durante todo el proceso, pero que se calienta a elevadas temperaturas y luego se enfría a una rapidez moderada debido a que la diferencia de temperatura con el metal cercano es relativamente pequeño. Como se observa en el diagrama hierro-carbono de la figura 34, la temperatura de esta zona intermedia se encuentra en el rango de formación de austenita (ASTM, 1985).

Figura 34. Relación pozo de soldadura – diagrama hierro carbono

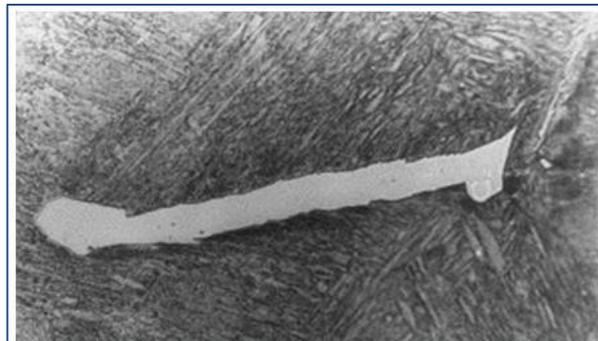


Fuente: código de soldadura estructural-acero AWS D1.1/D1.1M:2010

La microestructura original del acero (probablemente ferrita + perlita si no se aplicaron tratamientos térmicos) cambia a austenita, y debido a que el enfriamiento es moderado, los granos de austenita formados tienden a ser relativamente grandes. Ver figura 34.

5.1.4 Ferrita alotriomórfica. El término “alotriomórfica” significa que esta fase es cristalina y ordenada en su estructura interna pero no en sus bordes exteriores. La ferrita alotriomórfica es la que primero en nuclear (a 910°C en hierro puro, pero puede bajar hasta 710°C en acero con 0.77% de C). Nuclea en los bordes de grano de la austenita, y crece mediante un proceso de reconstrucción que implica la reorganización de todos los átomos (NOVAKOVIC, 2014).

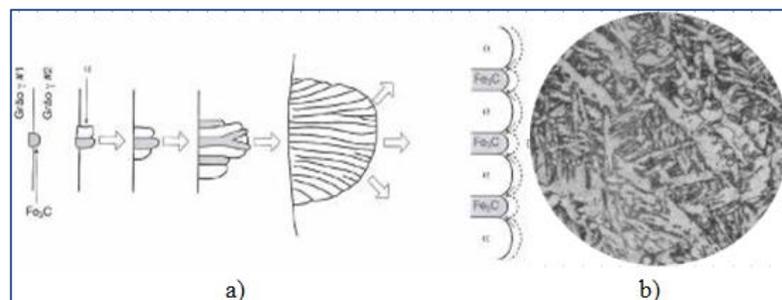
Figura 35. Ferrita alotriomórfica presente en el pozo de la soldadura



Fuente: Metalografía para Estudiantes 2012

5.1.5 Ferrita acicular. La metalurgia de una soldadura es muy diferente del material de matriz soldadura de metales de relleno están diseñados para crear soldaduras fuertes y duras, que contienen partículas de óxido finas que permiten la nucleación de granos finos.

Figura 36. Ferrita acicular



a) Crecimiento de la estructura de grano b) Ferrita Acicular

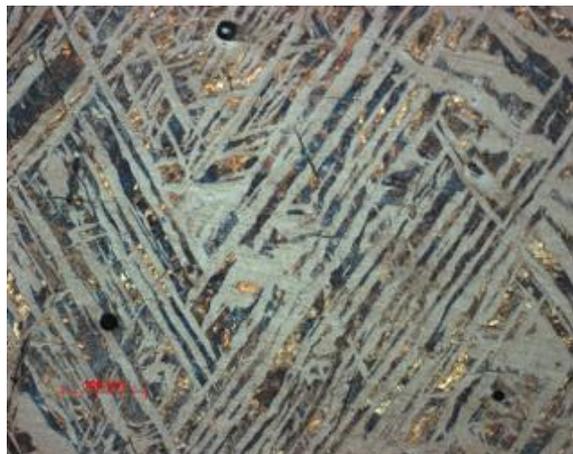
Fuente: Metalografía para Estudiantes 2012

Cuando una soldadura se solidifica, sus granos crecen de la estructura de grano supuesto HAZ, mayor refinamiento se lleva a cabo dentro de estos cereales secundarios que crean la formación de ferrita acicular típica.

Es también comúnmente observada en los depósitos de soldadura de aceros de baja aleación. Esta fase es de considerable importancia tecnológica ya que provee una microestructura relativamente tenaz y resistente (NOVAKOVIC, 2014). Ver figura 36.

5.1.6 Ferrita wittmanstätten. Por último está la ferrita wittmanstätten, que presenta una estructura en forma de placas puede nuclear en los bordes de grano austeníticos y en la ferrita alotriomórfica formada previamente (NOVAKOVIC, 2014). Ver figura 37.

Figura 37. Formación de ferrita wittmanstätten

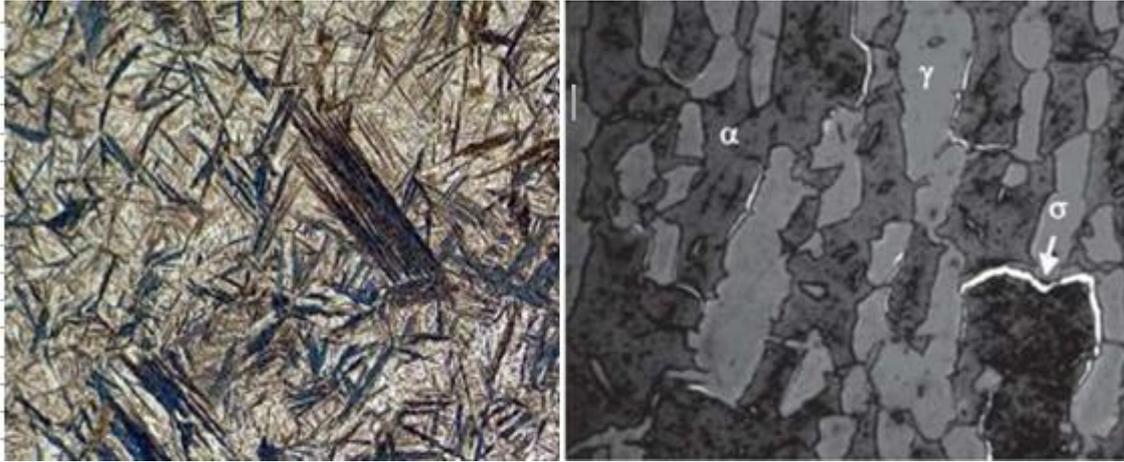


Fuente: Autor

5.1.7 Microfases. Es el término usado para describir a las pequeñas cantidades de martensita, austenita y perlita las cuales se forman después de que todas las otras fases principales (ferritas alotriomórfica, de widmanstaetten, acicular) ya lo han hecho. Cuando los depósitos de soldadura se enfrían a aproximadamente 500 °C, la mayoría del austenita se consume y la pequeña cantidad de austenita restante (aproximadamente 5%) se enriquece de carbono y se transforma en martensita, o en perlita degenerada pues no tiene la oportunidad de establecer una estructura laminar.

Con velocidades de enfriamiento lentas se favorece la formación de perlita relativa a martensita. Después del enfriamiento algo de austenita puede ser retenida a la temperatura ambiente (NOVAKOVIC, 2014). Ver figura 38.

Figura 38. Microfases



a) Microestructura o fase martensita, b) microestructura de la ZAT en la unión soldada. La fase oscura corresponde a la fase ferrita, la fase clara a la fase austenita y la fase brillante, corresponde a la fase sigma.

Fuente: Autor

5.1.8 Transformaciones en la fase sólida durante el enfriamiento. Cuando se realiza la soldadura se crean transformaciones en estado sólido en la zona fundida, pero existen situaciones en las cuales en estas zonas son afectadas significativamente, entre estas el enfriamiento brusco por el ambiente que está sometida dicha soldadura, lo que afecta a los constituyentes del acero (ferrita y perlita) y a la naturaleza de fases metaestables.

5.2 Ciclo térmico de la soldadura

El ciclo térmico de la soldadura constituye en cada punto del metal base un estado térmico, definido por la máxima temperatura alcanzada, y la velocidad de enfriamiento, que determinan los siguientes parámetros.

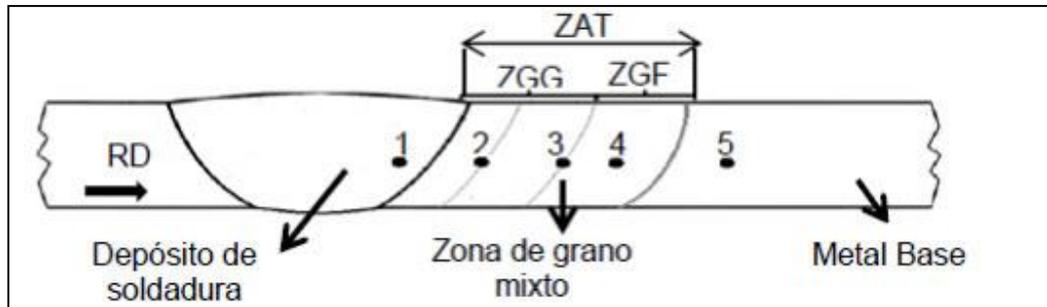
En la mayoría de procesos de soldadura por fusión, una fuente de calor concentrada de alta intensidad es aplicada entre los elementos a unir de la junta y movida a lo largo de esta.

El calor generado por esa fuente se disipa principalmente por conducción a través de las piezas y produce la variación de la temperatura a lo largo de ellas.

Esta variación de temperatura producida durante la soldadura en un punto de la pieza se

describe por su ciclo térmico. Ver figura 39 y tabla 19.

Figura 39. Ciclo térmico de la soldadura



Fuente: Metalografía para estudiantes 2012

Calculo de la Energía Transferida a la Pieza:

$$Hn = \frac{\eta * V * I}{Vs} \tag{3}$$

Dónde:

V, voltaje

I, intensidad

Vs, velocidad de avance

η , eficiencia del arco o redimiendo térmico del proceso

Para el cálculo del ciclo térmico se requieren de los siguientes datos:

Tabla 19. Datos utilizados en la determinación del ciclo térmico de una unión soldada

Datos que se utilizan para la determinación del ciclo térmico de una unión soldada					
Material	Espesor del Material	Corriente de Arco	Voltaje de Arco	velocidad de soldadura	Rendimiento
n/a	S(mm)	I (A)	V(Voltios)	Vs (mm/s)	(η)
ASTM A588	25	231	23	3,39 (conversión de proveedor)	0,6

Fuente: Tabla de datos proporcionados por el proveedor

Energía Transferida a la Pieza: Hn= 940,35 J/m

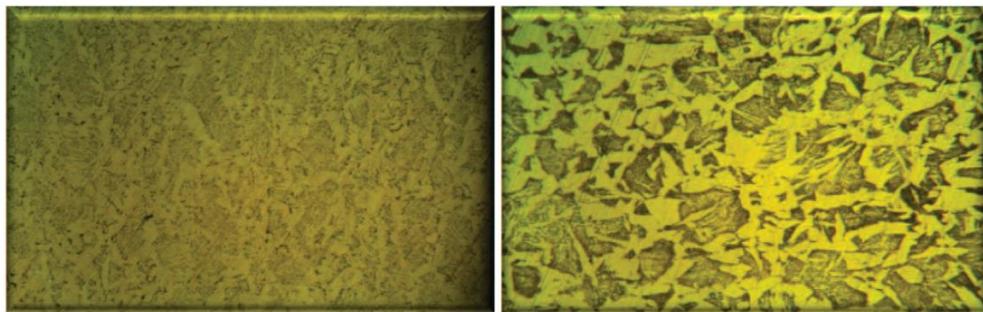
5.3 *Tamaño de grano.* El tamaño de grano tiene un notable efecto en las

propiedades mecánicas del metal. Los efectos del crecimiento de grano provocados por el tratamiento térmico son fácilmente predecibles. La temperatura, los elementos aleantes y el tiempo de impregnación térmica afectan el tamaño del grano.

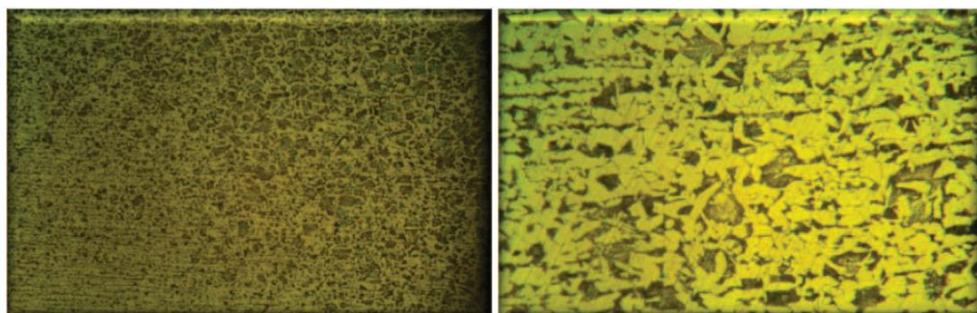
En metales, por lo general, es preferible un tamaño de grano pequeño que uno grande. Los metales de grano pequeño tienen mayor resistencia a la tracción, mayor dureza y se distorsionan menos durante el temple, así como también son menos susceptibles al agrietamiento. El grano fino es mejor para herramientas y dados. Sin embargo, en los aceros el grano grueso incrementa la dureza, la cual es deseable a menudo para la carbonización y también para el acero que se someterá a largos procesos de trabajo en frío.

Todos los metales experimentan crecimiento de grano a altas temperaturas. Sin embargo, existen algunos aceros que pueden alcanzar temperaturas relativamente altas (alrededor de 1800 F o 982 C) con muy poco crecimiento de grano, pero conforme aumenta la temperatura, existe un rápido crecimiento de grano (ROBINO, 2010) Ver figura en la siguiente figura.

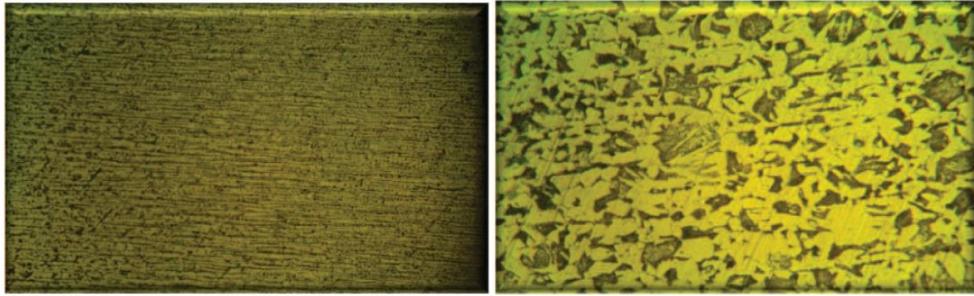
Figura 40. Tamaño de grano



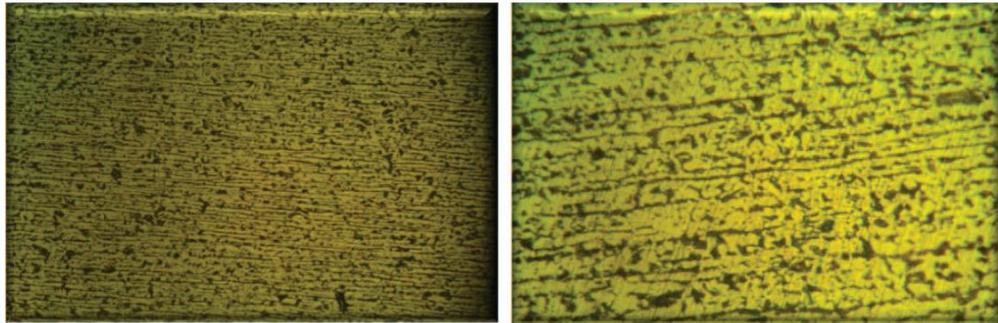
a) Micrografía de la zona de soldadura o línea de fusión



b) Micrografía de la zona de fusión parcial



c) Zona transformada por ZAT

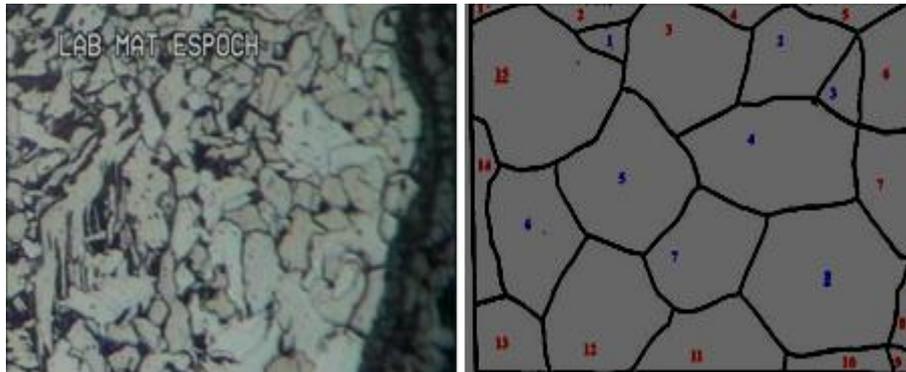


d) Micrografía del metal base

Fuente: Autor

El tamaño de grano se determina según la ASTM con la siguiente ecuación:

Figura 41. Tamaño de grano según ASTM



a) Micrografía de la ZAT b) Numeración y conteo de granos

Fuente: Autor

$$n = 2^{N-1} \quad (100x) \quad (4)$$

Dónde:

n = número de granos en una pulgada cuadrada a 100 x

N = número de grano ASTM (E 112)

Tamaño de la micrografía: (77 mm * 101 mm)

$n = \text{Granos totales} / (\text{tamaño micrografía}/25,4^2)$

$$= 15,5 / [(77*101)/(25,4*25,4)] = 1,3 \text{ granos/inch}^2$$

$$1,3 = 2^{N-1} \rightarrow \log 1,3 = (N-1) \log 2; N = (\log 1,3/\log 2) + 1 = 1,4$$

$N \approx 1$ ASTM Ver Figura 38.

Tabla 20. Designación ASTM según el tamaño de grano

Número N A.S.T.M.	Granos/mm ²	Longitud promedio en mm
-3½	0,685	1,051
-3	0,969	0,884
-2½	1,370	0,743
-2	1,938	0,625
-1½	2,740	0,526
-1	3,875	0,442
-½	5,480	0,372
0	7,750	0,313
½	10,96	0,262
1	15,50	0,221
1½	21,92	0,186
2	31,00	0,156
2½	43,84	0,131
3	62,00	0,110
3½	87,68	0,0929
4	124,0	0,0781
4½	175,4	0,0657
5	248,0	0,0552
5½	350,7	0,0465
6	496,0	0,0391
6½	701,4	0,0328
7	992,0	0,0276
7½	1 403	0,0232
8	1 984	0,0195
8½	2 806	0,0164
9	3 968	0,0138
9½	5 612	0,0116
10	7 936	0,00977
10½	11 220	0,00821
11	15 870	0,00691
11½	22 450	0,00581
12	31 740	0,00488

Fuente .TablaVIII.36 (pág. 309) “Ciencia de los Materiales”, para un tamaño de grano ASTM 1, la longitud promedio del grano es 0,221 mm

5.4 *Caracterización microestructural.* La preparación de la muestra puede dividirse en tres fases:

- Desbaste grosero
- Desbaste final
- Pulido.

Cabe indicar que la muestra fue tomada de la zona de soldadura.

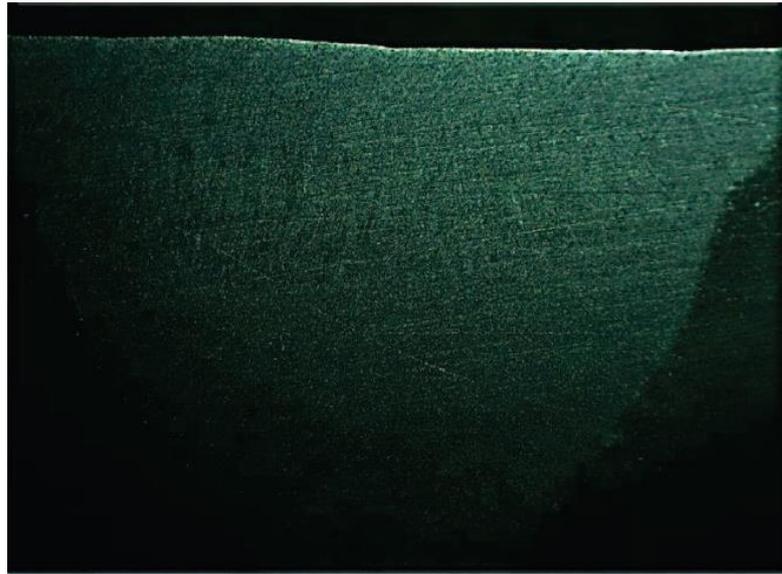
5.4.1 *Desbaste grosero.* El desbaste grosero se practica una vez extraída la probeta con la finalidad de reducir las irregularidades, producidas en la operación de extracción, hasta obtener una cara lo más plana posible. Esta operación puede realizarse con una cinta de desbaste o bien en el caso de materiales no muy duros como aceros sin templear y fundiciones se puede hacer con lima, aunque aumente algo la distorsión que se produce en la superficie a causa de la fluencia del material (**ROBINO, 2010**).

5.4.2 *Desbaste final.* La operación comienza con un abrasivo de 150, seguido del 250, 400, para terminar con el 600 o 1000. El desbaste se puede realizar a mano o con desbastadoras mecánicas. Para el caso de desbaste manual el papel abrasivo se coloca sobre una placa plana y limpia y se mueve la probeta longitudinalmente de un lado a otro del papel aplicándole una presión suave; se debe mantener la misma la dirección para que todas las rayas sean paralelas. Durante la operación se debe dejar que una corriente de agua limpie los pequeños desprendimientos de material y a su vez lubrique y refrigere la zona desbastada.

5.4.3 *Pulido.* El pulido tiene por objeto eliminar las rayas finas producidas en el desbaste final y producir una superficie con características especulares. Esta operación por lo general se realiza en forma mecánica y se utiliza un paño impregnado con partículas de algún abrasivo en solución acuosa.

Básicamente, se pueden utilizar dos tipos de paños: con pelo (pana, terciopelo, lanas) y sin pelo (seda natural). Se debe elegir el que más se adapte al tipo de material a examinar. Luego de esta operación se ataca con nital al 2% (ácido nítrico y alcohol) durante 5 segundos y analizadas mediante microscopía óptica. Ver Figura 43

Figura 42. Muestra de pozo de soldadura o zona de soldadura

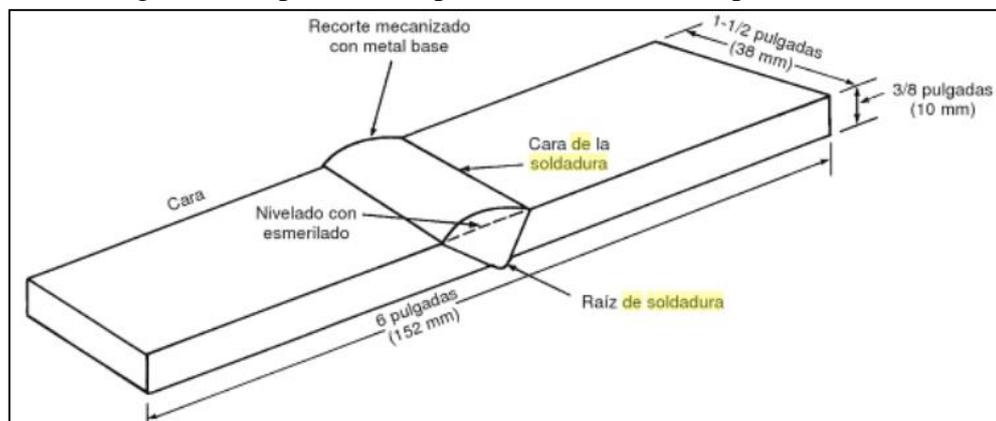


Fuente: Autor

5.4.4 *Evaluación de la microestructura del material base.* En la microestructura analizada presenta granos de Ferrita y Perlita, como es una característica de estos elementos estar presentes en el contorno del grano es decir en las esquinas el porcentaje de Ferrita observado es del 17 % y el 83 % de Perlita.

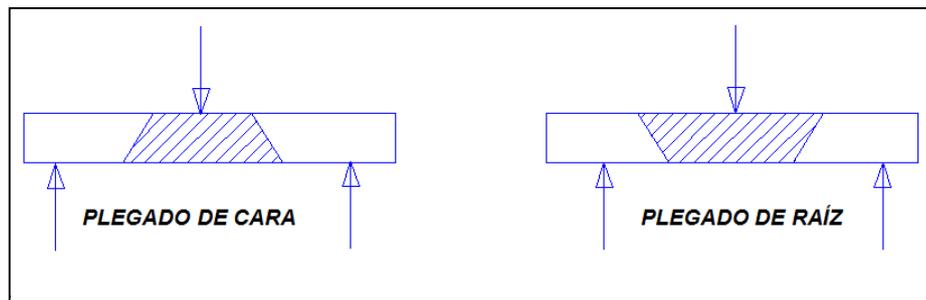
5.4.5 *Medición de la dureza.* En la microestructura analizada y según la Tabla 10 y 11 se dice que de ser necesario y por pedido del contratista se someterá la muestra a un ensayo de dureza y que los ensayos de Raíz, lateral y de cara sería suficiente. Ver figura 43 y 44.

Figura 43. Espécimen de placa de acero soldada para doblado



Fuente: código de soldadura estructural-acero AWS D1.1/D1.1M:2010

Figura 45. Distribución de cargas para ensayo de doblado en placa de acero soldada /código de soldadura estructural-acero AWS D1.1/D1.1M:2010



Fuente: Autor

CAPÍTULO VI

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

Se logró construir las especificaciones del procedimiento de soldadura para puentes estructurales.

Las especificaciones de los códigos AWS D1.1:2010 y D1.5M/D1.5 en el procedimiento de soldadura para puentes estructurales fueron determinantes para el agrupamiento preciso de conceptos y normas recomendadas para el desarrollo del procedimiento de soldadura.

El ensayo visual aplicado a la probeta soldada y según los parámetros del WPS generado en primera instancia, fue satisfactoria, asegurando de esta manera la confiabilidad de dicho documento.

Las pruebas mecánicas de doblado develaron la excelente calidad de la soldadura, siendo el pase de raíz el factor predominante para la aprobación o no de dicha soldadura y por consiguiente la calificación del soldador.

El análisis de la microestructura de la soldadura crea un ambiente de confiabilidad sumamente alto, ya que presenta el debido porcentaje tanto de ferrita como de cementita, de igual manera el tamaño de grano.

6.2 Recomendaciones

Seguir con rigurosidad los parámetros expuestos en el Procedimiento de soldadura, esto se verá reflejado en la calidad de la misma, más aún en el tema del precalentamiento del material base, para alivianar el enfriamiento brusco del material.

Colocar a la distancia recomendada las placas biseladas (3mm) para asegurar una penetración completa y también desarrollar de la mejor manera el pase de raíz.

La sobre monta o sobre soldadura después de haber terminado de rellenar la junta debe ser de 1/32" o de 1mm.

Utilizar los elementos de seguridad industrial adecuados para la realización de los trabajos con soldadura.

Los residuos de alambres deben almacenarse en contenedores cerrados con la presencia de un desecante o en su defecto calentado a una temperatura de 6-8 C° por sobre la temperatura ambiente.

BIBLIOGRAFÍA

- ASTM, International. 1985.** Metal Handbook. s.l. : Desk, 1985.
- AWS. 2010.** Structural Code-Steel AWS D1.1/D1.1M:2010. 2010.
- . **2010.** Structural welding code steel. *AWS D1.1/D1.1M*. [En línea] 2010.
- . **2006.** Structural Welding Code-Steel AWS A5.5/2006. 2006.
- INDURA. 2009.** Recomendaciones de almacenamiento para productos de soldadura. [En línea] 01 de 03 de 2009. http://www.indura.cl/_file/file_4221_file_2584_recomendaciones_generales_almacenamiento.pdf.
- MELO, Oscar. 2013.** Soldadura por arco con núcleo de fundente "FCAW". [En línea] 2013. <http://www.monografias.com/trabajos46/soldadura-por-arco/soldadura-por-arco.shtml#ixzz3H0YIRZac>.
- METALOGRAFÍA, ESTUDIANTES. 2012.** Soldadura. [En línea] 03 de 07 de 2012. <http://blog.utp.edu.co/metalografia/2012/07/23/10-soldadura-10-1-procesos-de-soldadura/>.
- NOVAKOVIC, Rodolfo. 2014.** Nuevas investigaciones. 2014.
- PERDOMO, Mario. 2011.** Estudio comparativo de puentes construidos por voladizos sucesivos. 2011.
- ROBINO, Guillermo. 2010.** Materiales. Lima : s.n., 2010.
- RODRIGUEZ, Manuel. 2004.** Electrodo tubulares. [En línea] 01 de 06 de 2004. <http://www.monografias.com/trabajos87/electrodos-tubulares/electrodos-tubulares.shtml#ixzz3FcJljOwY>.
- SEROPE, Kalpakjian. 1999.** *Manufactura, ingeniería y tecnología*. 1999.
- TENORIO, Jonatán. 2012.** Construcción de puentes. [En línea] 08 de 09 de 2012. <https://es.scribd.com/doc/105275769/Construccion-de-Puentes-en-Concreto>.
- WEMAN, Klas. 2003.** *Welding processes*. Nueva York : s.n., 2003.

